



Nr B 2430
September 2021

Framtidens slamhantering vid Roslagsvattens reningsverk i Margretelund

Beskrivning av nuläget för slambehandling

Christian Baresel, Jing-Jing Yang, Aleksandra Lazic, Peter Axegård





I samarbete med: Roslagsvatten AB och C-Green Technology AB

VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

Författare: Christian Baresel (IVL), Aleksandra Lazic (Roslagsvatten AB), Peter Axegård (C-Green Technology AB), Jing-Jing Yang (IVL)
Medel från: Stiftelsen IVL, Roslagsvatten och C-Green
Fotograf: Roslagsvatten AB
Rapportnummer B 2430
ISBN 978-91-7883-332-0
Upplaga Finns endast som PDF-fil för egen utskrift

© IVL Svenska Miljöinstitutet 2021
IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Box 210 60, 100 31 Stockholm
Tel 010-788 65 00 // www.ivl.se

Rapporten har granskats och godkänts i enlighet med IVL:s ledningssystem

Förord

Roslagsvatten AB, C-Green och IVL Svenska Miljöinstitutet har initierat ett samverkansprojekt med målet att bygga ett ”slamfritt” avloppsreningsverk. Genom en ny teknik ska slam helt undvikas som slutprodukt i Roslagsvattens reningsverk i Margretelund utanför Stockholm. I den här första delrapporten för samfinansprojektet beskrivs nuläge i slambehandlingen med fokus på termiska processer som HTC och planering av genomförande och utvärdering av pilotförsöken vid Margretelund reningsverk och FoU-anläggningen Hammarby Sjöstadsverk.

Innehållsförteckning

Sammanfattning 6

Summary 7

1 Bakgrund 8

2 Syfte 9

3 Nuläge - Kompromisser i dagens avloppsslamhantering 10

3.1 Avloppsslam i Sverige idag: Hantering och utmaningar 10

3.1.1 Vikt- och volymminskning 10
3.1.2 Återföring av näringsämnen och organiskt material 11
3.1.3 Tungmetaller, mikroplast och organiska föroreningar 11
3.1.4 Patogena mikroorganismer 12
3.1.5 Lukt 12
3.1.6 Okända mikroföroreningar 13
3.1.7 Energiutvinning 13
3.1.8 Utsläpp av växthusgaser och kolsänka 13
3.1.9 Andra miljöeffekter 14

3.2 Lagstiftning och Revaq-certifiering 14
3.3 Slamhantering vid Margretelunds ARV 15

4 Ett innovativt koncept för framtidens slamhantering 17

4.1 HTC - Hydrotermisk karbonisering 17

4.1.1 Fördelar med HTC-tekniken 17
4.1.2 Utmaningar med HTC-tekniken 19
4.1.3 Användning av HTC-biokol 20
4.1.4 Konkurrerande/kompletterande tekniker 23

4.2 Integrering av HTC-behandling i svenska avloppsreningsverk 25

4.2.1 Närsaltsåterföring 26
4.2.2 Mullbildande ämnen, lukt och hygienisering 27
4.2.3 Energiförbrukning och biobränsleproduktion 27
4.2.4 Reduktion av direkta och indirekta växthusgasemissioner 28
4.2.5 Reduktion av mikroföroreningar 28

4.3 Framtidens slamhantering vid Margretelunds ARV 28

4.3.1 C-Greens OxyPower HTC 29
4.3.2 Implementering av OxyPower HTC vid Margretelunds ARV 29
4.3.3 Fokusområden för utvärderingen 30
4.3.4 Basscenario 32

5 Diskussion och slutsatser 34

Referenser 35

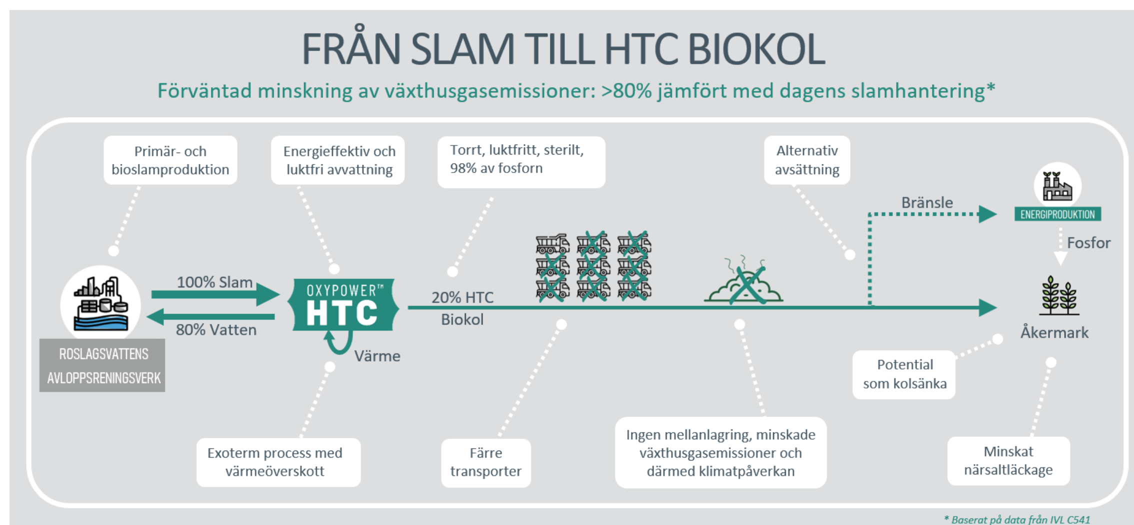
Sammanfattning

Svenska avloppsreningsverk står inför nya utmaningar i samband med anpassningen till ett mer hållbart och cirkulärt samhälle. Detta gäller även slamhanteringen med fokus på fosforinnehållet vilket skulle kunna ersätta en stor del gödselbehovet i lantbruket. Inte minst på grund av de ökade kraven på lägre restkoncentrationer av olika föroreningar i slammet, ökade krav på vattenreningen som i vissa fall kan medföra att mer föroreningar hamnar i slammet, och försiktighetsprincipen blir dock en direkt slamspridning på åkermark en allt större utmaning. Hantering av restprodukter, lukt och utsläpp av växthusgaser är andra utmaningar som kräver en modifierad slamhantering.

Hydrotermisk karbonisering (HTC) av avloppsslam har potential att bli en av teknikerna för framtidens slamhantering som även kan ge en förenklad slamhantering vid reningsverk. HTC-tekniken skulle kunna ge en hållbar återvinning av närsalter och medföra andra positiva effekter som t.ex. mindre växthusgasutsläpp. Idag saknas dock data och praktiska erfarenheter för detta slamhanteringsalternativ vid svenska reningsverk.

Pilotprojektet vid Margretelunds reningsverk i Åkersberga syftar att undersöka om den förslagna systemlösningen med HTC-teknik kombinerat med våtoxidation av HTC-vatten kan utgöra ett hållbart alternativ för framtidens slamhantering vid svenska reningsverk. Rapporten beskriver nuläget vid Margretelunds reningsverk och den tänkta implementering av framtidens slamhantering samt vilka kritiska aspekter som projektet identifierat i dagens slamhantering och som ska undersökas i projektet.

HTC-processen kommer förutom HTC-biokol även att generera ett HTC-vatten som bl.a. innehåller föroreningar som annars skulle ha släpps ut till miljön vid slamspridning. För att undersöka vilken teknik som kan åstadkomma en resurseffektiv rening av detta filtrat, ska olika pilotreningssteg sättas upp vid FoU-anläggningen Hammarby Sjöstadsverk som matas med filtratet som produceras vid HTC-piloten och rejektvatten från Margretelund reningsverk.



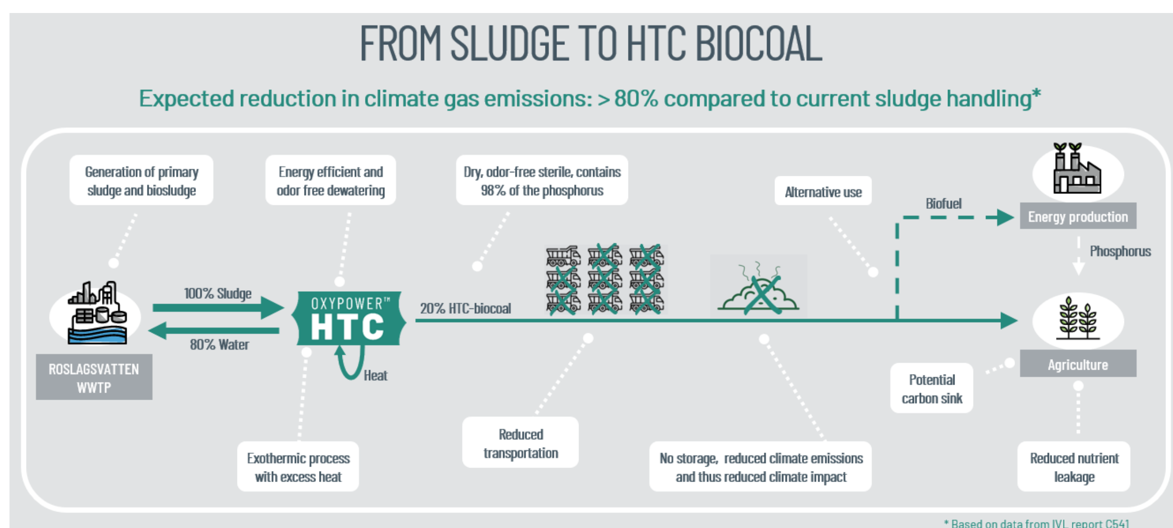
Summary

Swedish wastewater treatment plants (WWTPs) are facing new challenges in connection with the adaptation to a more sustainable and circular society. This also applies to sludge management with focus on phosphorus, which in principle could replace a large part of the need for fertilizer in agriculture. However, not least due to the increased requirements for lower residues of various contaminants in the sludge, increased requirements for water treatment which in some cases can lead to more contaminants ending up in the sludge, and the precautionary principle, a direct sludge spread on arable land becomes an increasing challenge. Management of residual products, odours and greenhouse gas emissions are other challenges that require an adaptation in sludge management.

Hydrothermal carbonation (HTC) of sewage sludge has the potential to become one of the technologies for future sludge management that can also provide a simplified sludge management at wastewater treatment plants. HTC-technology could provide a sustainable pathway for recycling of nutrients and bring other positive effects such as, e.g. less greenhouse gas emissions. Today, however, there is a lack of data and practical experience for this sludge management alternative at Swedish wastewater treatment plants.

The pilot project at Margretelund WWTP in Åkersberga (Sweden) aims to investigate whether the proposed system solution with the HTC-technology combined with wet oxidation of HTC-process water can be a sustainable alternative for future sludge management at Swedish WWTPs. The report describes the current situation at Margretelund WWTP and the intended implementation of future sludge management as well as the critical aspects that the project has identified in today's sludge management and which will be investigated in the project.

In addition to HTC-biochar, the HTC-process will also generate an HTC-process water which, among other things, contains pollutants that would otherwise have been released to the environment during sludge spreading. To investigate which technology that can achieve a resource-efficient treatment of this filtrate, various pilot treatment steps will be set up at the R&D facility Hammarby Sjöstadsverk, which are fed with the filtrate produced by the HTC-pilot and reject water from Margretelund WWTP.



1 Bakgrund

Svenska avloppsreningsverk står inför nya utmaningar i samband med anpassningen till ett mer hållbart och cirkulärt samhälle. Detta kräver både en bättre rening av föroreningar, mindre utsläpp till miljön, återföring av viktiga resurser till kretsloppet och minskade utsläpp av klimatgaser. Allt detta ska dessutom åstadkommas med så låg miljöpåverkan och maximal kostnadseffektivitet som möjligt. Även med avseende på slamhanteringen står svenska reningsverk inför förändringar. Fokus för dagens hantering av slam från kommunala avloppsreningsverk ligger ofta på återvinning av näringsämnen genom spridning av slammet på åkermark. Den totala försäljningen av fosfor, med ursprung i råfosfat från gruvor, i form av mineralgödsel i Sverige uppgår till 11 400 ton (SCB, snitt 2009/10–2015/16). Samtidigt skulle fosfor utvunnen ur slam teoretiskt kunna ersätta drygt 30% av dagens fosfor i mineralgödsel. Inte minst på grund av de ökade kraven på lägre restkoncentrationer av olika föroreningar i slammet, ökade krav på vattenreningen som i vissa fall kan medföra att mer föroreningar hamnar i slammet, och försiktighetsprincipen blir slamspridning på åkermark en allt större utmaning.

Slamspridning på åkermark har uppmärksammats under senare år och framförallt har olika sätt att återföra fosfor till åkermark samt slamspridningen generellt diskuterats i media. Denna debatt har också visat hur polariserad frågan är. Reningsverkens branschorganisation Svenskt Vatten arbetar aktivt med frågan och förordar slamspridning genom kvalitetskontroll av metaller och patogener i slammet (så kallad Revaq-certifiering). Samtidigt går flera europeiska länder ifrån slamspridning. Sedan 2018 är det t.ex. i Tyskland förbjudet att sprida slam på jordbruksmark från stora reningsverk (>50 000 pe) samtidigt som krav på sam- eller monoförbränning och fosforåtervinning ur askan införs. Kapaciteten för monoförbränning av slam låg 2020 på 498 000 ton TS/år i Tyskland och bedöms öka till 1 108 000 ton TS 2028. Detta motsvarar 29 respektive 67 % av den totala slam-volymen (Ecoprog 2020). Även i Schweiz och Nederländerna är spridning av avloppsslam på jordbruksmark förbjudet sedan drygt 10 år och förbränning är den vanligaste metoden för kvitt-blivning.

Under sommaren 2018 tillsatte den svenska regeringen en utredning för att utreda ett framtida förbud mot spridning av slam från avloppsreningsverk till mark samt krav på fosforåtervinning från avloppsslam (Kommittédirektiv 2018:67). Utredningen presenterade två möjliga vägar för fosforåtervinning från avloppsslam. Den första innebär ett totalförbud för all typ av spridning, alltså inte enbart spridning på jordbruksmark. Den andra innebär att hygieniserat och kvalitetssäkrat slam fortsatt får spridas på produktiv jordbruksmark. Vidare föreslogs ett fosforåtervinningskrav på minst 60 % av den fosfor som finns i avloppsslammet för allmänna avloppsreningsverk med en storlek över 20 000 pe (SOU 2020:3). Skulle restriktioner mot slamspridning på mark införas som följd av regeringsutredningen, behöver nya strategier på sikt utvecklas för VA-huvudmännens slamhantering. I en ny publikation diskuteras olika aspekter och utmaningar med slamhantering i Sverige (Ekane et al., 2021).

Avloppsslam representerar slutstationen för många av de tusentals kända och okända substanser som samhället släpper ut till avloppsvatten och som överförs till slammet i avloppsreningsverk. Eftersom mål om återvinning av näringsämnen samtidigt blir allt tydligare och intresset för att utnyttja avloppsslam som en energiresurs och att minska växthusgasemissioner relaterade till slamhanteringen blir allt större, kommer andra slambehandlingsmetoder mycket sannolikt att spela en allt viktigare roll i framtiden. Detta blir ännu viktigare med tanke på att den producerade slammängden ökar för varje år.

En stor del av den utveckling som för närvarande pågår i Sverige inom slamhantering syftar främst till en mer hållbar återföring av fosfor samt en ökad biogasutvinning. Dessa utvecklingsarbeten är en viktig del men täcker ändå bara in en mindre del av de aspekter som behöver diskuteras för framtida slamhanteringssystem som till exempel växthusgasemissioner, mikroföroreningar, m.fl. Det finns bland annat mycket kunskap och erfarenheter från andra länder som bör beaktas och påverka Sveriges väg framåt. Svensk kunskap inom VA-området skapar dessutom en utmärkt bas för utveckling av innovativa och resurseffektiva system för ett hållbart samhälle.

Vid diskussioner om slamavsättningsmetoder fokuseras ofta på minskning av slamvolym, energi-utvinning, utsläpp av växthusgaser och olika mikroföroreningar i slammet då dessa aspekter är viktiga för att möta samhällets behov. Ett systemperspektiv är ett måste för att få fram bästa möjliga slamhanteringsätt och det är troligt att flera olika hanteringssystem kommer att behövas än bara ett för att tillgodose och täcka upp olika behov, förutsättningar och ambitionsnivåer. I detta projekt testas och utvärderas en möjlig väg framåt.

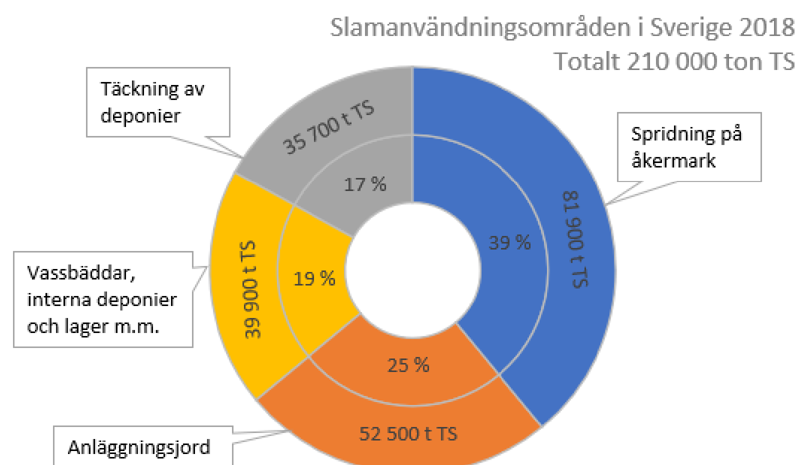
2 Syfte

Syftet med denna delaktivitet inom samverkansprojektet är att presentera på ett övergripande sätt nuvarande slamhantering vid svenska avloppsreningsverk (ARV) och specifikt Roslagsvattens reningsverk. Utmaningar i dagens slamhantering ska synliggöras och ett alternativt slamhanteringssystem baserat på hydrotermisk karbonisering beskrivas och diskuteras. Baserat på teknikutvecklingen samt med hänsynstagande till en fokusändring i samhället till mer holistiska avfallshanteringssystem och en minimering av den totala miljöpåverkan, ska det presenterade alternativet utgöra en utgångspunkt för en uppföljning och utvärdering med hjälp av pilotester vid Margretelunds ARV och FoU-anläggningen Hammarby Sjöstadsverk.

3 Nuläge - Kompromisser i dagens avloppsslamhantering

3.1 Avloppsslam i Sverige idag: Hantering och utmaningar

Sveriges kommunala avloppsreningsverk producerade 2018 drygt 210 000 ton slam (TS) vilket är en ökning med 3,6 procent eller 7 351 ton TS sedan 2016 (*SCB, 2018*). Det vanligaste användningsområdet för slammet är spridning på åkermark (39 %, en ökning med 5 % sedan 2016), följt av anläggningsjord (25 %) och täckning av deponier (17 %, en minskning med 5 % sedan 2016). Enligt statistiken förbrändes inget slam i Sverige under 2018. Resterande del av slammet (19%) läggs på vassbäddar, interna deponier och lager m.m.



Figur 1. Fördelning av olika användningar av kommunalt avloppsslam i Sverige 2018.

Avloppsslam betraktas av många aktörer, både forskare, myndigheter och VA-aktörer, som en resurs som behöver utnyttjas. Arbetet med att åstadkomma detta baseras dock på olika förutsättningar, antaganden och föreställningar om vad som är den bästa slamhanteringen. Uppfattningarna går från att avloppsslam i huvudsak bör betraktas som avfall som mestadels består av olika typer av föroreningar varav många är kvalificerade miljögifter (LRF 2010; Växjö tingsrätt, 2012; Sveriges Konsumenter i Samverkan, 2014) till att användning av slam som gödselmedel i jordbruket är den bästa lösningen som ger närings- och humusåterföring, som kräver liten energianvändning och inte har några negativa effekter på den yttre miljön (Svenskt Vatten, 2013). De olika substanserna i slammet och dess betydelse utgör förstås grunden till de olika bedömningarna tillsammans med skillnader i vad som är det grundläggande syftet med slambehandling. De viktigaste syftena med avloppsslambehandlingen återges därför i efterföljande text.

3.1.1 Vikt- och volymminskning

Slambehandlingen utförs till stor del för att åstadkomma en vikt- och volymreduktion av slammet. Producerat slam i svenska reningsverk kan minska i vikt och volym med 7-10 gånger från blandslam (sekundär- och primärslam) till dagens slutprodukt efter slamstabilisering, samt slamavvattning. Även utan slamstabilisering åstadkommes en kraftig vikt- och volymreduktion. Minskningen av vatteninnehållet är den största orsaken till volymreduktion (där TS-halten i

slammet typiskt kan ökas från ca 3 % till ca 25 % genom avvattningen) men även en viss nedbrytning av organiskt material vid slamstabiliseringen är en bidragande orsak.

Vikt- och volymminskning av slam innebär en enklare slamhantering och minskade transporter och utgör därmed en av de viktigaste aspekterna i ett slamhanteringssystem.

3.1.2 Återföring av näringsämnen och organiskt material

Hur stor roll innehållet av näringsämnen i slammet spelar kan tolkas på olika sätt. Dels anses behovet av näringsämnen kunna täckas via bättre planering och hantering av t.ex. gödsel från djurhållning, dels genom att minska den diffusa spridningen och läckage av fosfor. Enligt andra uppfattningar utgör näringsämnen den viktigaste delen av slammet som därför behöver återföras till jordbruket (Svenskt Vatten, 2013).

Framför allt fosforn i slammet men även kvävet utgör en viktig resurs som borde återföras till kretsloppet även om de naturliga resurserna på fosfor inte tar slut direkt (KSLAT 2013) och kvävetillgångarna tekniskt sett är obegränsade. Även om kretsloppet för jordbrukets fosfor domineras av skörderester och stallgödsel (räknat på massflöden) så skulle slammets bidrag kunna täcka en del av den utförsel av fosfor som varje år sker via skörden och som uppgår till runt 9 000 t/år (FORMAS 2011; Jönsson 2019). Idag baseras den externt tillförda fosformängden på brytning av mineralfosfor som fosfor från slam delvis kan ersätta. Det finns dock även andra ansatser som eventuellt kan ge tillgång till fosfor som skulle påverka behovet att återföra fosforn från kommunalt avloppsslam. LKABs CleanMAP-teknologi för att framställa fosfat från malmbrytningsrester skulle t.ex. kunna täcka minst hela det svenska fosforbehovet om all fosfat skulle kunna utvinnas. Kadmiumhalten i ammoniumfosfatprodukten bedöms dessutom ligga under 1 mg Cd/kg P (LKAB 2018). Det är dock ännu oklart vilken roll denna teknik kommer spela i framtiden.

Det har även visats på mervärdet av att återvinna både kväve och svavel från avloppsslam (FORMAS 2011). Eftersom kväve tillverkas från kvävgas, vilket det inte råder brist på i atmosfären, är en direktåterföring från slam till åkermark inte lika kritiskt. Ur resursförbrukningssynpunkt behöver dock en återvinning värderas då stora resurser används för att omvandla kväve (främst ammoniumkväve) i avloppsvatten till kvävgas samtidigt som stora energimängder (mestadels fossilt) används för att producera kvävegödsel från kvävgas.

Även mullbildande ämnen i slammet lyfts ofta fram som viktig för att upprätthålla åkermarkens bördighet (Börjesson 2021). Utan eller med stabiliseringen utgörs mer än hälften respektive ca hälften av slammet av organiskt material som i sin tur inkluderar humusliknande ämnen är positiva för jordens mullhalt (Formas 2011). Det finns dock även argument att slammets mullverkan kan åstadkommas genom andra metoder såsom en anpassad växtföljd, skörderestbehandling, skördenivå, stallgödsel etc.

Återföring av näringsämnen till åkermark är en viktig del av slamhanteringen. Återföringen bör dock ske utan kontaminering av oönskade föroreningar.

3.1.3 Tungmetaller, mikroplast och organiska föroreningar

Kända organiska och oorganiska föroreningar som kan finnas i slam är tungmetaller, mikroplaster, rester av bekämpningsmedel, PFAS och ftalater, personliga hygienprodukter, läkemedelsrester, och dioxiner, eller nedbrytningsprodukter av dessa. De ämnen som betraktas som farligast är både

toxiska, svårnedbrytbara, hormonstörande och kan bioackumuleras. Genom slamcertifiering (Revaq) kan en viss kvalitet av slammet garanteras med avseende på maximala gränsvärden för de vanligaste föroreningarna såsom tungmetaller och smittoämnen. Arbetet med Revaq har via omfattande uppströmsåtgärder gett tydligt mätbara förbättringar i slamkvalitet med avseende på tungmetallinnehåll. Förutom direkt nytta för Revaq-anslutna reningsverk och deras upptagnings-områden har arbetet även bidragit till en allmänt god kännedom om vilka de största källorna för punktutsläpp av föroreningar från samhället till avloppet är.

Uppströmsarbetet är viktigt ur ett större samhällsperspektiv för att förebygga och begränsa användning av potentiellt farliga ämnen. Möjligheterna att minska vissa föroreningar genom uppströms- och förebyggande arbete har dock en begränsad potential på grund av användningen och källfördelningen av dessa ämnen i samhället. Men även på grund av de kostnader som uppströmsarbetet innebär i form av bl.a. omfattande kartering, kontroller, och kampanjarbete.

Tungmetaller och organiska föroreningar bör inte föras vidare med slam till naturen. Detta för att undvika ackumulering och negativa miljöeffekter.

3.1.4 Patogena mikroorganismer

Avloppsslam kan innehålla smittämnen i form av bakterier, parasiter, virus, och svampar. De vanligaste patogenerna som man finner i svenska slam är *Salmonella*, *Campylobacter*, *Giardia*, *Cryptosporidium*, *Escherichia coli*, och andra enterokocker och stafylokocker samt norovirus som alla kommer in till reningsverken via avloppsvattnet. Det finns stora variationer i förekomst av levande oönskade mikroorganismer i slammet. Detta i kombination med att reningsprocesserna inte är optimerade för reduktion av patogener gör att det är svårt att förutse när ökade smittrisker förekommer. Tidigare har det inte funnits specificerade krav på förekomst av dessa ämnen i slam för användning på jordbruksmark eller annan mark i Sverige. Trots detta har vi hittills inte haft några nämnvärda smittproblem som kunnat spåras till slamspridning i Sverige. Detta är naturligtvis bra, men ger samtidigt inga garantier att det inte kan ske i framtiden. Smittskydds-institutet har länge arbetat för att införa en reglering som omfattar all markanvändning och de flesta är idag överens om att slamhygienisering behövs för en säker återföring till jordbruk. Idag täcks patogenkontrollen för spridning av slam till åkermark av reningsverkens Revaq-certifiering där rötning och långtidslagring (6 månader) hittills ansetts vara tillräckligt för att döda av de vanligaste patogena mikroorganismerna (Revaq 2015). En skärpning av hygieniseringskraven för avloppsslam avsedd för produktiv jordbruksmark är dock att vänta.

Hygienisering av slam för att minska smittorisken från mikroorganismer är en förutsättning för en direkt slamanvändning på åkermark.

3.1.5 Lukt

Eftersom slammet till stor del består av olika organiska föreningar som genomgår en biologisk nedbrytningsprocess, så uppstår det lukt i samband med all slamhantering, framförallt vid slamlagring. Slamstabilisering och vidaregående slambehandling som exempelvis torkning och annan termisk behandling kan minska risken för luktstörningar från slutprodukten, dock kan ökade luktproblem uppstå lokalt vid själva behandlingen.

Luktproblem bör hanteras och undvikas vid slambehandlingen.

3.1.6 Okända mikroföroreningar

Avloppsreningsverk samlar upp en stor del av samhällets utsläpp och slammet innehåller redan idag flera ämnen vars halter och effekter på miljö och hälsa får anses som okända eller i bästa fall bristfälliga (Bergman *et al.*, 2013). I takt med att redan existerande ämnen får nya användningsområden i samhället och nya ämnen ständigt kommer till, så ökar komplexiteten i riskbedömningen för slammets eventuella effekter på miljö och hälsa. Kunskap om nya ämnen tar tid att bygga upp och effekten i miljön kan oftast bedömas först efter många år av exponering. Även nanopartiklar, mikroplast, läkemedel, personliga hygienprodukter, kosmetika, och antibakteriella substanser som leder till resistens hos bakterier bör beaktas i denna kategori. Till det kommer okända bi- och/eller nedbrytningsprodukter som kan uppstå som en följd av användningen av dessa substanser eller i processteg där dessa ämnen passerar, liksom eventuella s.k. cocktaileffekter där två eller flera ämnen i kombination kan ha en synergiskt toxisk effekt som är svår att förutse. Denna aspekt tas sällan i beaktande i dagens slambehandling och -användning. Både kemikalieinspektionen och läkemedelsverket förordar t.ex. ett totalstopp av direkt slamspridning till åkermark med hänvisning till försiktighetsprincipen eftersom kunskapen om de farliga ämnen som återfinns i slammet är bristfällig, i synnerhet när de kombineras.

Hur olika mikroföroreningar i slam lämpligen ska hanteras behöver utredas ytterligare för att öka förståelsen om eventuella negativa effekter på miljön. Detta för att kunna bedöma olika slamhanteringstekniker utifrån förmågan att immobilisera eller på annat sätt minska risken för negativa miljöeffekter.

3.1.7 Energiutvinning

Genom anaerob slamrötning kan energiinnehållet i slammet delvis omvandlas till biogas som i sin tur kan omvandlas/upparbetas till både el, värme och biodrivmedel. Baserat på överslagsvärden för slammets energiinnehåll, utrötningsgraden, energibehovet för avvattning och uppvärmning för slamhantering vid svenska ARV resulterar detta i en nettoenergiutvinning på <40 % av den totala kemiskt bundna energin för reningsverk med slamrötning (Svenskt Vatten 2013). Det kan noteras att teknikutvecklingen har minskat energibehovet för vissa av dessa hanteringssteg t.ex. genom moderna skruvpressar för slamavvattning. En del av uppvärmningsenergin kan också delvis återvinnas vid värmeväxling av utgående rötslam eller rejektvatten. En del av de energiflöden som krävs, exempelvis för uppvärmning av rötkammare och för hygienisering, kan tillgodoses med lågvärdiga energiformer som hetvatten vilket skulle reducera behovet av högvärdig elenergi.

Endast en mindre del (40 %) av den energin som finns i slammet kan idag tillnyttogöras som nettoenergi. Denna bioenergi kan dock ersätta fossila bränslen och därmed minska utsläpp av växthusgaser som bidrar till den globala uppvärmningen.

3.1.8 Utsläpp av växthusgaser och kolsänka

Vid dagens slamhantering uppstår växthusgasemissioner vid spridning av slam samt under långtidslagringen av slammet, vilket beror på utsläpp av koldioxid, metan och lustgas från lagringen (Jönsson et al., 2015; Willen et al., 2016; Pradel et al., 2012). De största emissionsavgångarna sker under den första tiden av lagringen. Både lustgas och metan är starka växthusgaser och har därför en hög klimatpåverkan. Även vid själva spridningen genereras emissioner av växthusgaser. Dessutom uppstår delvis höga emissioner vid rötning, mellanlagring och en eventuell uppgradering av producerad biogas p.g.a. kallfackling och metanslip. Orötat slam kan jämfört med rötat slam ha en större emissionspotential. Detta pga. att t.ex. metan som kan bildas vid nedbrytning av orötat slam inte kan ersätta fossila bränslen som vid kontrollerad slamrötning.

Både slam (till viss del) och biokol som produceras från slam fungerar även som kolsänkor som anses ha potential att bidra till att uppnå klimatneutralitet. Tekniker som producerar biokol klassas därför bl.a. av Internationella klimatpanelen som ”Negative Emissions Technology” (NET, IPCC 2019). För slam har t.ex. Willén et al. (2017) uppskattat att ca 7 % av det organiska kolet finns kvar efter 100 år. Vid termokemiska processer som pyrolys och hydrotermisk karbonisering av slam omvandlas organiska substanser till ett kolanrikat material som kemiskt har likheter med brunkol med en aromatisk ligninliknade struktur. Eftersom slammets kolinnehåll bindas fastare i biokol tar det lång tid innan kolet omvandlas till koldioxid och återgår till atmosfären. Därför har biokol större kolsänkapotential än slam. Orötat slam och biokol som produceras från orötat slam har en högre potential som kolsänka jämfört med rötat slam respektive biokol som produceras från rötat slam. För nuvarande finns det dock fortfarande olika åsikter om den kumulativa kolsänkapotentialen för biokol generellt (Minx et al., 2018).

Stora utsläpp av växthusgaser som sker vid dagens slamhantering behöver beaktas vid framtida slamhanteringsmetoder. Slam och framför allt biokol från slam har kolsänkepotential om kan bidra till att minska den globala uppvärmningen.

3.1.9 Andra miljöeffekter

Spridning av slam till åkermark har enligt Grundestam et al. (2020) och Svanström et al. (2016) en högre försurningspotential än andra undersökta slamhanteringssätt. Det är framför allt lagring och spridning av slammet ger upphov till utsläpp av ammoniak till luft som bidrar till försurning. Även övergödningspotentialen bedöms större vid lagring och spridning av slam jämfört med andra hanteringsmetoder. Dock finns stora osäkerheter i t.ex. fosfortillgängligheten i olika slamprodukter och därmed potentialen att ersätta andra gödselprodukter. Dessutom undersökte Grundestam et al. (2020) och Svanström et al. (2016) endast slamspridning med föregående anaerob stabilisering (rötning).

3.2 Lagstiftning och Revaq-certifiering

Jämfört med den gällande EU-lagstiftning om slamspridning enligt EU-kommissionens slam-direktiv från 1986 (86/278/EEG) har Sverige definierat något hårdare krav i föreskrifterna för avloppsslam (SNFS 1994:2). Utöver dessa finns även lagstiftning som styr hur och när organiska gödselmedel får spridas (Jordbruksverkets föreskrifter). EU har dessutom öppnat för att det gamla och utdaterade slamdirektivet från 1986 kan komma att revideras. Detta efter att när direktivet utvärderades 2014 (Ares(2020)311654) identifierades ett antal brister, som till stor del relaterade till EU:s ambitioner om cirkulär ekonomi, föroreningar i slam inklusive föroreningar av växande problem (t.ex. organiska kemikalier som läkemedel, PAH och PFAS, kosmetika och mikroplast).

Även Sveriges miljömål berör slamhanteringen. I preciseringarna till *Giftfri miljö* ingår att den samlade exponeringen för kemiska ämnen inte ska vara skadlig för människor eller den biologiska mångfalden samt att användningen av särskilt farliga ämnen så långt som möjligt har upphört. Miljö- och hälsofarliga ämnen i slam som registrerats sedan 2004 och som inkluderar cirka 150 ämnen, varav 10 är metaller och resterande organiska ämnen, visar att andelen ämnen med minskande halter i slam inte har ändrats avsevärt för årsintervallet 2009-2013 jämfört med 2013-2017. Samtidigt har andelen ämnen med ökande halter fördubblats (Naturvårdsverket 2021).

Utöver dessa lagar och föreskrifter finns även Revaq, ett certifieringssystem för avloppsslam med syfte att minska flödet av oönskade ämnen till de svenska reningsverken och därigenom skapa en

hållbar återföring av växtnäring via slamspridning (Svenskt Vatten, 2019). Revaq implementerades 2008 av Svenskt Vatten, Svensk Dagligvaruhandel, Lantmännen och LRF (Regeringsbeslut M2012/317/ke). Revaq-certifierat slam innebär att ett kontrollprogram med flera parameter såsom lagstiftade metaller och andra, för det aktuella reningsverket, prioriterade spårelement säkerställa en godkänd slamkvalitet utifrån Revaqs gränsvärden. Revaq-certifierade ARV bedriver ett aktivt uppströmsarbete för att minska emissioner av metaller och smittoämnen som kan kontaminera slammet. De gällande gränsvärdena i Revaq är betydligt strängare än vad som anges i både svensk lagstiftning och i EU:s direktiv. Inom Revaq justeras också dessa gränsvärden kontinuerligt ner. I Revaq anges också krav på hygienisering (Svenskt vatten, 2019) genom minst 6 månaders lagring eller genom någon av de metoder som anges i rapporten ”Hållbar återföring av fosfor” (Naturvårdsverket, 2013).

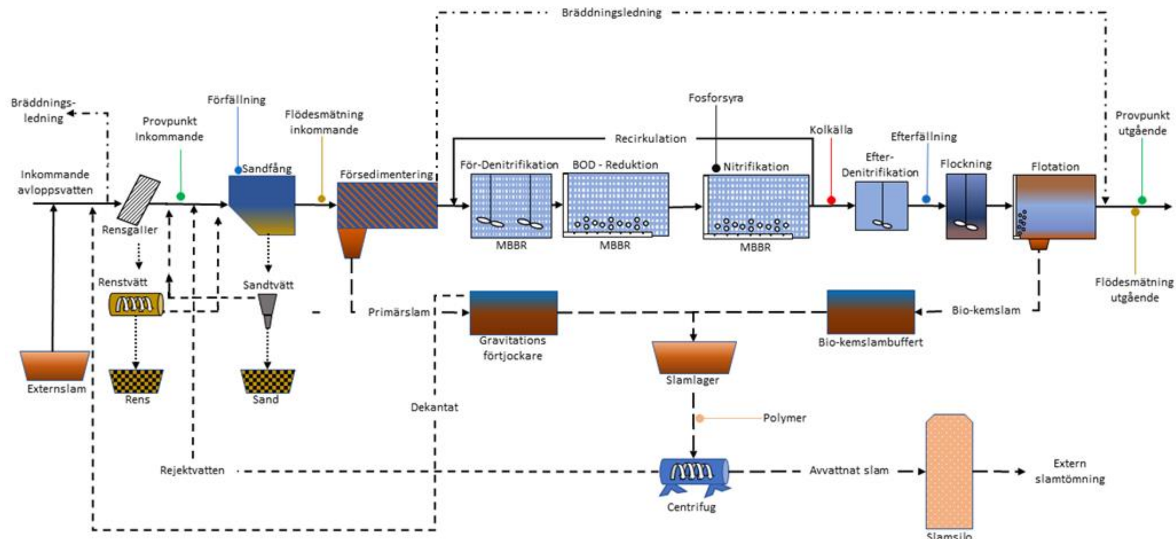
Utredningen om en giftfri och cirkulär återföring av fosfor från avloppsslam lämnade sitt betänkande Hållbar slamhantering till regeringen i början av 2020 (SOU 2020:3). Utredningen föreslår två olika alternativ på förbud mot användning av avloppsslam på mark:

1. Ett förbud mot all spridning på all mark av allt avloppsslam.
2. Ett förbud med utgångspunkt i att eventuella risker med slamspridning kan hanteras och åtgärdas. Det vill säga ett undantag från förbudet för användning av slam som är hygieniserat och kvalitetssäkrat på produktiv jordbruksmark.

Båda alternativen skulle träda i kraft efter en övergångstid på 12 respektive 15 år efter beslut för ARV >50 000 pe respektive <50 000 pe. Dessutom föreslås ett krav på återvinning av minst 60% fosfor ur avloppsslam för ARV >20 000 pe där slamspridning på åkermark räknas som återvinning av fosfor. Enligt tidsplanen skulle beslut i riksdagens miljöbalksändringar fattas under 2021, men beslutet ser ut att dröja.

3.3 Slamhantering vid Margretelunds ARV

Roslagsvatten ABs avloppsreningsverk i Margretelund behandlar avloppsvatten från Åkersberga kommun och Brottby (som är ett mindre samhälle i Vallentuna kommun), samt från delar av Resarö i Vaxholms kommun. Verket tar dessutom emot en mindre mängd avloppsslam från andra små reningsverk inom Roslagsvatten. Inkommande avloppsvatten består huvudsakligen av hushållsspillvatten men även av avloppsvatten från några mindre industrier, internt behandlat avloppsvatten från ett antal biltvättar och lakvatten från en deponi. Den genomsnittliga belastningen år 2020 var ca 35 370 pe men reningsverket byggs ut för en belastning på 125 000 pe år 2050. Recipient för det behandlade avloppsvattnet är Trälhavet. Verket togs i drift i slutet av 1950-talet och byggdes ut i mitten av 70-talet. Under 1998-1999 byggdes verket åter ut för att klara en ökad belastning, kvävereduktion och ökade reningskrav beträffande fosfor och BOD (Roslagsvatten AB 2000).



Figur 2. Flödesschema Margretelund reningsverk inkl. slamhanteringen.

Slambehandlingen som visas i Figur 2 består av att primärslam och slam från förfällningssteget förtjockas i en gravitationsförtjockare. Icke rötat biologisk slam avvattnas tillsammans med primärslam i centrifug till en genomsnittlig TS-halt på 27 % och mellanlagras i en mindre slamsilo. Externt slam lämnas i en slammottagningsanläggning, alternativt i inkommande steg för behandling.

Allt slam från Margretelunds reningsverk under 2020 (3 705 ton med TS 26,5 %) användes för deponitäckning. Slammet bedöms dock ha en god kvalité och uppfyller Revaq-kraven som skulle tillåta en återföring av växtnäring via slamspridning. Margretelunds reningsverk är ett Revaq-certifierat sedan oktober 2021.

I likhet med andra VA-bolag har Roslagsvatten tagit fram en slamstrategi där fokus inte bara ligger på att återvinna fosfor men också på att nyttiggöra växtnäring, mikronäringsämnen och mull-bildande ämnen i slammet. Roslagsvattens slamvision när det gäller fosfor är att återvinna mer än 60 % av fosforn i slammet och samtidigt att bidra till en bra miljö för boende i området genom minimering av slamlukt och slamtransporter. Den kanske största utmaningen som finns i dagsläget är att välja en slambehandlingsmetod för det framtida reningsverket på Margretelund när det samtidigt är oklart om slam alls ska få spridas på åkermark i framtiden.

En teknikutvärdering som Roslagsvatten genomförde under 2020 (Lazic 2021) inkluderade 6 alternativa teknikkedjor:

(1) mesofil rötning;
(2) termofil rötning;
(3) termisk hydrolys + rötning;
(4) hydrotermisk karbonisering (HTC);
(5) mesofil rötning + HTC;
(6) HTC + monoförbränning +fosforutvinning.

Dessa utvärderades mot 24 kriterier (inklusive bl.a. teknikmognad, hänsyn till slamdirektiv, arbetsmiljö & driftsäkerhet, ekonomi, resurshushållning och emissioner) och resulterade i högsta betyg för teknikkedjan 4 med endast HTC-tekniken. I samtliga scenarier ingick rejektvattenrening, luftrening, slamlagring och en slamprodukt av Revaq-kvalité som kunde användas på åkermark.

4 Ett innovativt koncept för framtidens slamhantering

4.1 HTC - Hydrotermisk karbonisering

Vid HTC-processen (Hydro Thermal Carbonization), som också kallas för våtpyrolys (wet pyrolysis), behandlas biomassan (substrat) i syrefri miljö vid ett tryck på 20-35 bar och en temperatur på 180-260 °C (Figur 3). Trycket krävs för att undvika kokning. Själva reaktionen är en svagt exoterm process varvid energi i form av värme frigörs. Mängden energi som frigörs beror på typ och mängd av det organiska innehållet i den biomassa som behandlas. För avloppsslam och framför allt rötat slam är denna organiska andel lägre än för andra substrat vilket medför att det krävs en extra extern värmekälla för att upprätthålla processen. En optimerad energiåtervinning kan dock reducera detta energibehov. Vid processen sker både dehydrering och dekarboxylering av organiska ämnen varvid dessa blir mer hydrofoba och aggregeras till partiklar av HTC-biokol som kan avvattnas mekaniskt till en torrhalt över 60% TS. Bildad gas består främst av koldioxid, vattenånga, och små mängder flyktiga kolväten (Excala et al., 2011). C-Green har analyserat sammansättningen av bildade permanenta gaser och detekterat >97 volymprocent CO_2 vid HTC-behandling av rötat kommunalt slam (C-Green 2021). Dessutom detekterades mindre mängder svavelväte och spårmängder av kolväten. I en industriell process behandlas avgaserna med kylning, skrubbning som tar bort svavelväte, och behandling med aktivt kol som tar bort kolväten.



Figur 3. HTC - Hydrotermisk karbonisering.

HTC-processen påverkar de allra flesta av slammets egenskaper och påverkar de tidigare nämnda miljöaspekterna direkt eller indirekt. Samtidigt elimineras behovet av slamlagring och vidare hantering, men innebär även ett extra behandlingssteg som kräver resurser för att kunna drivas och som skapar en sidoström som behöver behandlas.

4.1.1 Fördelar med HTC-tekniken

En studie utförd av Jeitz et al. (2012) på VA-anläggningen i Kaiserslautern (Tyskland, 100 000 pe) där avloppsslam traditionellt rötas, avvattnas mekaniskt, torkas och sedan tillförs förbränningen, beskriver att användning av HTC-processen skulle ge ett effektivare slamhanteringssystem. Den energi som produceras i vanliga fall i form av biogas och vid förbränning av slam skulle kunna ökas med 10 % om avvattnat slam i stället direkt tillförs HTC-processen utan rötning samtidigt som 20 % av den elektriska och 70 % av den termiska energiförbrukningen kan sparas in. Liknande besparingspotential rapporteras av Excala et al. (2011) som jämfört behandling av mekaniskt avvattnat slam med en TS på 30 % till ett biokol med TS på 95 %. Jämfört med den konventionella behandlingen med slamtorkning kräver HTC-behandlingen endast hälften av den elektriska energin och bara en fjärdedel av den termiska energin för att uppnå detta. Notera att värme-återvinningen från HTC-processen som kan användas för att värma upp slammet inför processen inte har tagits med i denna jämförelse. Även en komplettering med HTC-processen efter den

traditionella avvattningen efter rötning skulle ge en vinst enligt studien. BFE (2021) konstaterade t.ex. genom pilottester att HTC-behandlingen kunde ge en potentiell reducering av elförbrukningen med 23 % och värmebehovet med 61 % jämfört med slamtorkning.

Baier et al. (2013) har genomfört miljöbedömningar av flera olika slamhanteringsmetoder i Schweiz med termisk behandling av slam i mono-, sam-, eller cementförbränning som slutsteg. HTC-processen ingår som ett alternativ i flera upplägg; som behandlingssteg direkt efter vattenreningen eller efter anaerob stabilisering i olika förbränningsalternativ. Systemupplägg med HTC som en del representerar genomgående det bästa miljöalternativet oavsett påverkanskategori (klimatpåverkan, eutrofiering, försurning, ekotoxicitet (mark och vatten), toxicitet, m.m.). Samma studie har också visat genom pilot- och fullskaletester att avvattningsförmågan hos HTC-biokolet ökar avsevärt jämfört med slam och att fosfor kan återvinnas bra från HTC-biokol. Utöver det har testerna visat att andelen fosfor i biokolet ligger generellt högre än den i askan från slamförbränning och att ett något lägre pH i biokolet minskar förbrukningen av syra vid användning av utlakningsmetoder för fosforåtervinning. Återvinningen av fosfor kan dock också ske via utvinning från HTC-processvatten om HTC-processen utförs vid sura betingelser. Både utgångssubstratet, lägre pH (<4) och avsevärt längre behandlingstider (> 2 tim) leder till att mer fosfor hamnar i HTC-processvatten och kan sedan via t.ex. fosforlakning utvinnas (BFE 2021). Jämfört med fosforåterföring via HTC-biokolet innebär detta dock extra processresurser och en lägre återvinningsgrad för fosfor. En utmaning med sura betingelser är att betydande mängder av syralösliga metaller också hamnar i HTC-processvattnet.

Även andra LCA-studier tyder på miljöfördelar med en HTC-behandling även om det är svårt att jämföra olika studier då förutsättningar, antaganden och systemgränser varierar i hög grad. Grundestam et al. (2020) indikerar en lägre miljöpåverkan gällande övergödning och försurning för samtliga studerade framtida slamhanteringsalternativen där HTC ingår som ett alternativ jämfört med dagens slamhantering. Detta främst p.g.a. att de direkta utsläppen från slam som uppkommer vid lagringen och när slammet sprids eller läggs på deponi minskar. Klimatpåverkan kom studien däremot fram till är i samma storleksordning för de nya teknikkedjorna som för basfallen. Dock undersöktes endast ett fåtal specifika teknikkedjor.

Hydrotermisk karbonisering kräver ingen eller endast en mekanisk föravvattning beroende var i slamhanteringen den appliceras. Appliceras HTC-processen på slam med en TS-halt på 9 % ökar avvattningsbarheten avsevärt efter HTC-processen och TS-halter på 52% för anaerobt stabiliserat och 70 % för ostabiliserat slam vid användning av endast mekanisk avvattningsteknik (centrifugering och press) har rapporterads (BFE 2021; Excala et al. 2011). HTC-processen blir dock betydligt energieffektivare vid höjd TS då mindre vatten behöver värmas till HTC-processens temperatur på ca 200 °C. HTC-processen ger även en total hygienisering av slammet. Den fasta slutprodukten kan vidarebehandlas till pellets eller annat och kan ersätta fossila bränslen i befintliga förbränningsanläggningar.

Processen är okänslig för olika eller ändringar i substratsammansättningen och reaktionstiden på några timmar (<5 tim) medför endast mindre reaktionsvolymer.

Energiinnehållet i HTC-biokol är jämförbart med naturligt kol och är därför användbart som ett fast bränsle (Fakkaew et al., 2018; Wilk 2016; Xu et al.; 2018). Tester visar att även kväve och svavel avlägsnas under processen med upp till 60 % vilket resulterar i ett renare bränsle jämfört med direkt slamförbränning (He et al., 2013). Dessutom verkar HTC-processen utjämna kvalitetsskillnader i bränsleegenskaper i biokolet jämfört med utgångssubstratet (Liu och Balasubramanian, 2012). Tester med ett antal olika bioslam (inte publicerade data, C-Green, 2021) visar att det högre

värmevärdet i den organiska delen av HTC-biokol ligger mellan 25-30 GJ/t medan det effektiva värmevärdet i HTC-biokol ligger mellan 4 -13 GJ/t TS. Den stora variationen i effektivt värmevärde beror främst på askhalten.

Eftersom HTC-processen innebär en nedbrytning av organiskt material vid höga temperaturer erhålls både en hygienisering och en viss reduktion av organiska biologiskt svårnedbrytbara föroreningar såsom läkemedelsrester.

4.1.2 Utmaningar med HTC-tekniken

HTC-processvatten innehåller höga halter av utlösta organiska substanser inkl. kväveföreningar som behöver separat behandling. Flera tekniker har undersökts och bl.a. tester med våtoxidation har visat en reduktion av DOC och COD med ca 40 - 55 % (Riedel et al., 2015). Dock omnämns just processvattenreningen som den största återstående frågan för tekniken (t.ex. Blach och Engelhart, 2021). C-Green har nyligen visat att en långt driven våtoxidation av HTC-processvatten kan reducera COD med över 99 % samtidigt som det mesta av kvävet omvandlas till kvävgas (Axegård, Björnerbäck; 2021, ej publicerade resultat). Även en blandning av HTC-processvatten med inkommande substrat för behandling i HTC-processen eller slamrötningen har undersökts bl.a. av IVL och C-Green för att minimera behovet av en extra rening av processvatten samtidigt som biogasproduktionen ökar.

Vid HTC-behandling av slam kan genotoxiska ämnen bildas och därmed kan det producerade HTC-processvatten innehålla toxiska föreningar (BFE 2021; Tasca et al., 2019; Wirth et al., 2015) som gör att en extra behandling av HTC-processvatten behövs för att undvika störningar vid återföring till reningsverket. Preliminära tester vid IVL i samarbete med C-Green under 2015 indikerade en kraftig toxicitet (EC50 <3 ml/l) vid Microtoxtestet för HTC-behandling vid olika temperaturer (200 - 230 °C) (IVL, inte publicerade data). Även genomförda hämningstester med olika HTC-processvatten visade en hämningseffekt på nitrifikationen redan vid låga inblandningsgrader (IVL, inte publicerat data). Samtidigt kunde ingen komplett hämning observeras vilket kan betyda att hämningseffekten är reversibel och att bakterierna över tid kunde anpassa sig.

Även genomförda metanpotentialförsök med olika HTC-processvatten tyder på att rötprocessen kan inhiberas, vilket också rapporteras av BFE (2021). Vanligt HTC-processvatten visar en hämning efter några dygn vilket kan beror på den höga ammoniumhalten som bildas under hydrolysen vid tillsats av HTC-processvatten som hämmar metanogenerna. För partiellt våtoxiderat HTC-processvatten ses däremot en direkt inhibering trots att både COD och NH4-N är mycket lägre än det än i vanlig HTC-processvatten. Inhiberingen beror förmodligen på fler toxiska ämnen eller att det organiska materialet förekommer i mycket svårnedbrytbara former som tar lång tid att hydrolysera. Det finns en svag tendens till återhämtning men aldrig överstigande positiv produktion (IVL, ej publicerade data).

Tungmetaller rapporteras ackumuleras i HTC-biokolet (Huang och Yuan, 2016; Kim et al., 2008; Wang et al., 2016; Zhang et al., 2014). Preliminära tester som genomförts av IVL och C-Green med HTC-behandlat slam från Himmerfjärdsverket visade att halter av Cr, Cu, Mn, Pb och Zn ökade i HTC-biokolet jämfört med det obehandlade slammet. Ökningen beror på utbytesförlusten. Samtliga halter låg dock även efter HTC-behandling under Revaqs gränsvärden (IVL, inte publicerade data). Nyare analysdata från C-Green visar att de flesta flervalenta metaller, kadmium och fosfor återfinns i HTC-biokolet med över 98 %.

Kemikalieförbrukningen kan öka något om en hög avvattning eftersträvas både före och efter HTC-behandlingen men anses generellt vara opåverkad. Detta kan förklaras med att en bättre avvattningsbarhet hos slammet minskar i princip även behovet av tillsatser för att uppnå samma torrhalt som vid avvattning av obehandlat slam. För att uppnå höga torrhalter kommer det dock krävas tillsatser av kemikalier i olika utsträckning. Som vid vanlig slamrötning är en hög TS-halt i det behandlade slammet också av fördel för HTC-processen då mindre vatten behöver hettas upp i processen.

HTC-processen har först börjat utvecklas från tidigt 2000-tal som ett alternativ för slamhanteringen. Därför finns det idag få fullskaleanläggningar och därmed få relevanta driftserfarenheter. För vår kännedom finns det 5 fullskaleanläggningar i drift i världen. Det tyska företaget TerraNova har en anläggning i drift i Kina för 50 ton slam/dygn och en anläggning är under uppförande i Mexico City med en kapacitet på 75 ton blött avfall/dygn. Ett annat tyskt företag, HTCycle har en anläggning för kommunalt slam (Tyskland). Det spanska företaget Ingelia har en anläggning i Spanien med kapacitet 50 ton kommunalt slam/ dygn samt en anläggning i England med kapacitet på 50 ton/dygn

C-Green har under 2021 tagit i drift en fullskalig HTC-anläggning, med våtoxidation av det vatten som separeras från slammet i HTC-processen, vid Stora Ensos massa/pappersbruk i Heinola, Finland. Att det finns få fullskaleinstallationer innebär också att inte alla potentiella begränsningar eller problem relaterade till HTC-tekniken är kända. Till exempel kan behandlingen av det producerade HTC-processvattnet ge upphov till utmaningar då inga kända långtidstester har utförts som kan utvärdera potentiell ackumulering av olika metaller etc. och relaterade process-störningar.

Att det finns få fullskaleinstallationer t.ex. i Tyskland som länge har sett HTC-tekniken som en lovande teknik kan även förklaras med problematiken av att avloppsslam klassas som avfall och en HTC-behandling inte ändrar denna status. Avsättningen av HTC-biokolet har därmed inte kunnat prissättas motsvarande värdet (Deutschlandfunk 2021).

Grundestam et al. (2020) gjorde t.ex. bedömningen att HTC-processen troligen är för storskalig för att vara ekonomiskt lönsam vid alla svenska reningsverk. Även generellt anses ofta att HTC-tekniken kräver stora investeringar på grund av att tekniken använder sig av hög temperatur och tryck. Samtidigt är dock processvolymerna avsevärt lägre än för t.ex. slamrötning vilket bör beaktas. En optimering av reaktordesign och den interna värmeåtervinningen pekas ofta på som de största utvecklingsområden vid HTC-tekniken. Andra, som även projektgruppen, hänvisar till att processvolymerna i en HTC-behandling är avsevärt mindre än t.ex. vid slamrötning pga. den korta uppehållstiden (en timme vs flera dagar) vilket ger lägre investeringskostnader. Dessutom anser bl.a. C-Green att HTC-processen är skalbar och kan byggas modulärt.

4.1.3 Användning av HTC-biokol

Eftersom HTC-biokol framställs från biologiska restprodukter, som kommunalt avloppsslam i det här projektet, så skapas förutsättningar för en kretsloppsanpassad produkt ifall bra användnings-områden för biokolet kan hittas. Det bör nämnas att HTC-biokol i dagsläget inte omfattats av European Biochar Certificate (EBC; www.european-biochar.org) definitionen för biokol som endast inkluderar biokol som produceras genom pyrolys av växtbiomassor.

Biokolets effekter som jordförbättringsmedel har varit kända länge men under senare tid har även biokolets potentiella klimatnytta och möjligheter att skapa en kolsänka fått ökat intresse.

Användningsområden av biokol och speciellt HTC-biokol kan vara många men beror på biokolets egenskaper som varierar beroende på ingående substrat och processbetingelser. Här beskrivs några av de användningsområden som kan tänkas för HTC-biokolet även om flera användningsområden kräver en vidare undersökning då de även också kan avse andra typer biokol.

SGI (Statens Geotekniska Institut) undersökte förutsättningar för närproducerat biokol där totalt 29 olika typer av biomassa har ingått. Slam från reningsverk bedömdes som ett av de fem bästa råmaterialen för biokolstillverkning (Enell et al., 2020). Avfall Sverige har utfört en marknadsstudie för biokol i Sverige med syfte att undersöka bl.a. betalningsviljan inom några användningsområden (Avfall Sverige 2018). Även Interreg-projektet Greater Bio (Greater Bio, 2021) har genomfört en marknadsanalys för biokol i Öresundsregionen.

Användningsområden för biokol från avloppsslam beskrivs nedan baserat på framför allt ovannämnda studier. Olika användningsområden och marknaden för biokol är ännu relativt outvecklad, inte bara i Sverige. Användningsområden kan tillkomma eller avskrivas när ny kunskaps tas fram. Enligt Avfall Sveriges syntes är den mest realistiska marknaden för biokol idag som jordförbättringsmedel med ett marknadspris som bedöms ligga mellan 2 600 – 3 000 kr per kubikmeter (Avfall Sverige 2018). Andra användningsområden kommer utvecklas över tid och speciellt om konkreta ekonomiska styrmedel implementeras som ökar betalningsviljan t.ex. för biokol som kolsänka.

4.1.3.1 Inom lantbruket och som jordförbättringsmedel

Största nyttan av biokol uppstår när behovet av att tillföra näringsämnen via konstgödsel minskar och att biokolet kan bidra till ökad bördighet och större skördar. Minskat behov av konstgödsel kan ge en indirekt minskning av växthusgasutsläpp eftersom produktionen av konstgödsel är mycket energikrävande. Biokolet kan dessutom bidra till ett minskat näringsläckage som kan ha en positiv effekt på nedströms vattenmiljöer och i slutändan Östersjön. Biokolet har dock också förmågan att hålla kvar fukt vilket kan ge positiva effekter då marken inte lakas ut av regnvatten (Chan et al., 2007). Vid denna användning diskuteras att biokol dessutom kunde ge dubbel klimatnytta eftersom kol dels lagras i mark, dels ökar växtligheten vilket i sin tur gör att mer kol binds in i det växtmaterial som växer upp. Biokolets beständighet i jorden bestämmer hur stor effekten som kolsänka bli. En hög nedbrytning i marken ger endast en marginell klimatnyttan. Råmaterialet för biokolet och processtemperaturer påverkar i hög grad hur stabilt biokolet blir. För biokol har angetts långa halveringstider i marken på 500 – 1 000 år (SVOA 2018). Biokolets stabilitet innebär också att biologiska nedbrytningsprocesser går mycket långsammare jämfört med slam vilket innebär att t.ex. kväve inte omvandlas till lustgas i samma utsträckning som vid direkt slamanvändning. Detta bidra också till klimatnyttan.

Biokol som jordförbättringsmedel avser den väl etablerade användning av biokol som anläggningsjord, delvis blandad med t.ex. kompost eller torv. Biokolets egenskaper gör att det också med fördel kan användas vid anläggning av gröna tak (Fransson et al., 2020; Greater Bio, 2021).

Möjligheten att ersätta torv med HTC-biokol har stor potential både volymmässigt och klimatgasmässigt. Detta studeras under 2021 i ett samarbete mellan C-Green och Econova (C-Green 2021).

4.1.3.2 Fyllnadsmedel i betong

Idag används olika tillsatser som t.ex. lecakulor och cellplast vid tillverkning av betong som ger betongen specifika egenskaper som att göra betongen lättare. Men även naturgrus som idag

används som fyllnadsmaterial vid betongtillverkning skulle delvis kunna ersättas med biokol (Avfall Sverige 2018). Utöver att en besparing av dessa ändliga resurser åstadkoms så kan även klimatbelastningen vid framställning av betong som ligger på ca 200 kg CO_2/m^3 minskas med ca 75 % om 25 procent av fyllnadsmaterialet skulle ersättas med biokol enligt uppgifter från Avfall Sverige (2018). Vid högre andel biokol kan även betong bli en kolsänka som dessutom varar längre än för bara biokolet. Betongegenskaperna kan dock påverkas negativt av biokol och mer kunskap kring detta användningsområde behöver tas fram.

4.1.3.3 Filtermaterial och absorbent

Biokolets ytegenskaper som porositet, yta och kemi (karboxyl-, karbonyl-, hydroxyl- och aromatiska grupper) öppnar för användning som filtermaterial för att adsorbera föroreningar i vatten eller luft. Ytegenskaper ger också en bra förutsättning för påväxt av biofilmer som kan användas i reningssyfte (t.ex. biofilter). Tester med aktiverat biokol baserat på antingen pyrolys eller HTC visade att HTC-biokolet uppnådde en högre aktiv yta och absorptionsförmåga än aktivt biokol från pyrolys (Gale et al., 2021). Tester med olika HTC-biokol framställda vid olika temperaturer visar också att adsorptionsegenskaperna kan påverkas av processbetingelserna (Niinipuu et al., 2020). Hur HTC-biokol av avloppsslam skulle vara lämplig som filtermaterial behöver dock undersökas vidare och speciellt med avseende för lakning av t.ex. tungmetaller som återfinns i biokolet. Att använda biokol till rökgasreningen bedöms bl.a. av Greater Bio (2021) som en av de troligaste applikationerna då detta ställer lägst krav på kolets kvalitet.

Enligt tyska forskningscentret för biomassa (DBFZ 2021) har HTC-biokol som tillverkats från avloppsslam framgångsrikt använts som pulveriserat aktivt kol (PAK). Adsorptionsegenskaperna liknade de för kommersiellt tillgängligt aktivt kol dock är det oklart om detta gäller HTC-biokol utan eller med vidarebehandling. För avloppsreningsverket kan detta vara särskilt attraktivt, eftersom det finns ett stort behov av avancerad rening där tillsats av PAK utgör en möjlig teknik.

4.1.3.4 Biobränsle

Energiinnehållet i HTC-biokol från avloppsslam rapporteras ligga på ca cirka 19 - 21 MJ/kg vilket är jämförbart med naturliga kol (Blach och Engelhart, 2021; Fakkaew et al., 2018). Även här kan olika processparameter vid HTC-behandlingen påverka biokolets energiinnehåll eller mängden producerat biokol (Silva et al., 2020). Naturligt nog påverkar även utgångsubstratet energiinnehållet av biokolet. Koller et al. (2011) rapporterade ca 1 550 kWh/t för rötat och ca 2 630 kWh/t för orötat blandslam efter mekanisk avvattning till ca 60% TS. Efter en ytterligare torkning till 90 % TS ökade energiinnehållet till ca 3 000 kWh/t respektive 4 800 kWh/t.

HTC-biokol tillverkat i C-Greens pilotanläggning och laboratorium visar att det högre värmevärdet (HHV) ligger mellan 27-30 GJ/t organisk TS för alla typer av bioslam oavsett om det är rötat eller ej. Medelvärdet av det effektiva värmevärdet (LHV) för 6 rötade kommunala slam från Sverige, Norge, Nederländerna och Österrike låg på 6,1 GJ/t TS (min 3,6 och max 8,5 GJ/t TS). HTC-biokol från orötat bioslam från Margretelunds reningsverk ligger på 11,4 GJ/t TS. Det effektiva värmevärdet styrs primärt av torrhalt och askhalt i HTC-biokolet.

4.1.3.5 Sanering av förorenad mark

Biokol från olika biomassor och framställt med olika processer kan vara mer eller mindre lämpliga för att stabilisera tungmetaller och PAH och kunde därmed användas för marksanering. Temperaturen vid tillverkningen spelar dock en stor roll för adsorptionsegenskaperna hos biokolet och långtidseffekter av användning av biokol som behandlingsteknik för förorenad jord behöver undersökas (Enell et al., 2020). Om just HTC-biokol från avloppsslam är lämpat för detta användningsområde är ännu ej klarlagt.

4.1.4 Konkurrerande/kompletterande tekniker

Det finns ett antal tekniker som ofta nämns i samband med framtiden slamhantering. Flera av dess kan anses som konkurrerande men även som kompletterande tekniker till HTC.

4.1.4.1 Torkning

Torkning av slam sker vanligast via konvektions- och kontakttorkning. Energibehovet för slamtorkning är högt och ligger mellan 900 – 1 500 kWh per ton borttaget vatten vilket innebär ca 650 – 1 050 kWh per ton slam med TS 25 % som torkas till TS 95 %. En mindre del av denna energi utgörs av elenergi. Termisk torkning har fördelen att olika värmekällor kan utnyttjas och att värmeåtervinning är möjlig. Slamtorkning åstadkommer en hygienisering (vid höga torktemperaturer), ammoniakavgång och en vikt/volymminskning av slammet. Även gödselvärdet (mängd närsalter per ton) av slammet kan öka men de totala metall- och fosformängderna påverkas inte. Växthusgasemissioner från slamlagringen och spridning av torkat slam kan minska avsevärt jämfört med vanlig slamhantering. En del av kvävet som vid slamslagring och -spridning skulle emitteras till atmosfären, yt- och/eller grundvatten skulle kunna tas hand om via behandling av torkkondensat. Hur en slamtorkning kan integreras vid reningsverk har undersökts bl.a. för Himmerfjärdsverket (Baresel et al., 2017). Torkningen och tillhörande efterbehandling producerar en granulerad eller pelleterad slamprodukt med >90 % TS som kan spridas på åkermark eller används för andra markanvändning om föroreningshalterna tillåter det. Torkat slam kan även förbrännas och har, beroende på askhalt, ett energiinnehåll (Lägre värmevärde (LHV)) på ca 2 000 kWh/ton torkat slam.

Torkning skulle i princip kunna kombineras med HTC-behandling för att öka den ingående TS-halten vid torkning. Med detta kunde man komma förbi limfasen (vid TS 45 %) och minska energibehovet för slamtorkning avsevärt (se t.ex. Jeitz et al., 2012). För- och nackdelar med en sådan teknikkombinationen såsom kostnader behöver dock i så fall beaktas.

4.1.4.2 Förbränning

Kommunalt avloppsslam kan samförbrännas både som avvattnat och torkat slam i en förbränningspanna med annat material som t.ex. hushållsavfall. Energiinnehållet i rötat avvattnat slam är dock mycket lågt (ca 200 kWh/ton) och även om torkat slam har ett högre energiinnehåll (ca 1 500 – 2 000 kWh/ton) så behövs det upp till ca 1 400 kWh/ton för själva torkningsprocessen. Från en energisynpunkt är slamförbränning därför inget attraktivt alternativ. En viss inblandning av avloppsslam kan dock vara en fördel vid förbränning av mycket torra bränslen eftersom en för snabb förbränning ger sämre värmeutbyte (SVOA 2018). Den höga askhalten i avloppsslam gör slammet inte heller till ett attraktivt förbränningssubstrat. Samförbränning av avloppsslam med andra avfall som har lägre fosforhalter genererar dessutom en aska med för låg fosforhalt (<4%) för att fosforutvinning ska vara möjlig med dagens tillgängliga tekniker. Askan klassas som avfall och behöver deponeras. Samförbränning bli då endast en teknik för kvittblivning av avloppsslam. Fördelen med förbränning är att alla mikroföroreningar som t.ex. mikroplaster, läkemedelsrester, PFAS (Engzell 2019) och andra organiska föroreningar förstörs, bildade rökgaser renas och föroreningar som tungmetallerna binds i askan och tas ut ur kretsloppet. Det finns också några system där samförbränning med andra organiska substrat kan ge både höga fosforhalter i askan som tillåter en fosforåtervinning och acceptabla energinivåer i substratmixen (Silfver 2020). Pilotförsök visar att samförbränning kan ske utan att några anpassningar i förbränningsprocessen behöver göras men beroende på slamsamsättning kan det också krävas anpassningar (Bhasin et al., 2020). Samma studie visade också att fosforhalter i askan, rökgasemissioner och kondensatsvatten påverkas av olika slamtyper. Fosforutvinningen behöver då ske i en separat anläggning/process.

En annan möjlighet som ger bättre ekonomiska förutsättningar till fosforutvinning är monoförbränning av slam i en separat panna. Det låga värmevärde i slammet innebär dock att slamtorkning behövs. Ur energisynpunkt är monoförbränning därför inget attraktivt alternativ även om förbränning kan ske utan extra energitillskott med en optimal energiåtervinning och användning för slamtorkning så som flera anläggningar i t.ex. Tyskland är uppbyggda som. Förutom fosforåtervinning ur askan och att mikroföroreningar förstörs så är monoförbränning endast en teknik för kvittblivning av avloppsslam och utvinning av fosfor från askan.

Både mono- och samförbränning kan kombineras med HTC för att öka slammet energiinnehållet i slammet före förbränningen. En analys av AFRY utförd åt C-Green visar att HTC behandling av en del av det ingående slammet i en monförbränningsanläggning minskar rökgasflödet pga. att mindre vattenånga bildas. Därmed kan kapaciteten ökas och mer slam kan förbrännas (AFRY 2021). I studien baseras monoförbränning av slam applicerat på den befintliga avfalls-förbränningspannan i Zürich som har varit i drift sedan 2016 (Axegård, ej publicerade data) och behandlar ca 100 000 ton slam per år som torkas med producerad ånga. Två fall utvärderades:

- 100 % slam torkas och förbränns.
- 20 % av slammet behandlas med OxyPower HTC varefter HTC-biokolet samförbränns med 80 % av ursprungligt slamflöde.

Jämförelsen visar att det minskade gasflödet vid HTC-fallet möjliggör att ytterligare 9 % slam kan förbrännas vid samma gasflöde som vid förbränning av 100 % slam. En ytterligare fördel är att överskottet av ånga och el ökar med 0,55 MW resp. 0,3 MW.

4.1.4.3 Pyrolys

Vid klassiskt pyrolys upphettas torkat slam (>65 % TS) till mellan 350°C och 1 000°C. Pyrolysen bildar biokol, bioolja, överskottsvärme och pyrolysgas. Pyrolysgasen är förbränningsbar och används tillsammans med överskottsvärmen till den föregående slamtorkningen. Rökgasen från förbränning av pyrolysgasen innehåller dock bl.a. NOx och kvicksilver vilket kräver en avancerad rökgasrening. Vid långsam pyrolys produceras biokol under lägre temperaturer från en timme och mer för att maximera koltillverkningen medan vid snabb pyrolys upphettas råvaran till högre temperaturer i några sekunder, vilket ger större mängder värdefulla biprodukter såsom biooljor. Biokolet som produceras innehåller en stor del av det organiska kolet vilket innebär att kolet betraktas som koldioxidsänka. Vid högre pyrolystemperaturer bryts mikroplast ner och även organiska mikroföroreningar som läkemedelsrester bör i alla fall delvis brytas ner.

I princip kan HTC utgöra en förbehandling före pyrolys istället för torkning speciellt vid katalytiskt pyrolys som kräver lägre torrhalter i det ingående slammet. Kombinationen torde bli kapitalkrävande. Andra för- och nackdelar med en sådan teknikkombinationen behöver också fall beaktas.

4.1.4.4 Våtoxidation

Våtoxidation (superkritisk eller hydrotermisk) av slam utförs under höga tryck (45 - 240 bar) och höga temperaturer (240 - 600 °C) och med tillgång till syre. Organiskt material i slammet oxideras till koldioxid och vatten. Energin som frigörs vid den exoterma oxidationsprocessen används för att värma upp slammet. Eftersom endast koldioxid och vatten produceras från det organiska materialet så uppstår ingen användbar slutprodukt utan tekniken kan anses som slamkvitt-blivning. Organiska mikroföroreningar förstörs dock och tungmetaller hamnar i den fasta askrika fasen. En del av fosforn kan hamna i processvattnet beroende på betingelserna som i så fall behöver hanteras. Återvinning av fosfor ut den oorganiska restprodukten har studerats men det

finns idag inga referensanläggningar. Veolias process Athos baserad på hydrotermisk våtoxidation (HTO) av slam finns uppförd på 5 olika reningsverk i Europa. Tekniken förefaller ganska tekniskt avancerad och utvinningsmöjligheter av fosfor ur den fasta produkten är något oklart (SVOA 2018). I princip borde Easy-Minings Ash2Phos process vara möjlig att applicera även på denna typ av förbränningsaska.

4.1.4.5 Termisk hydrolys

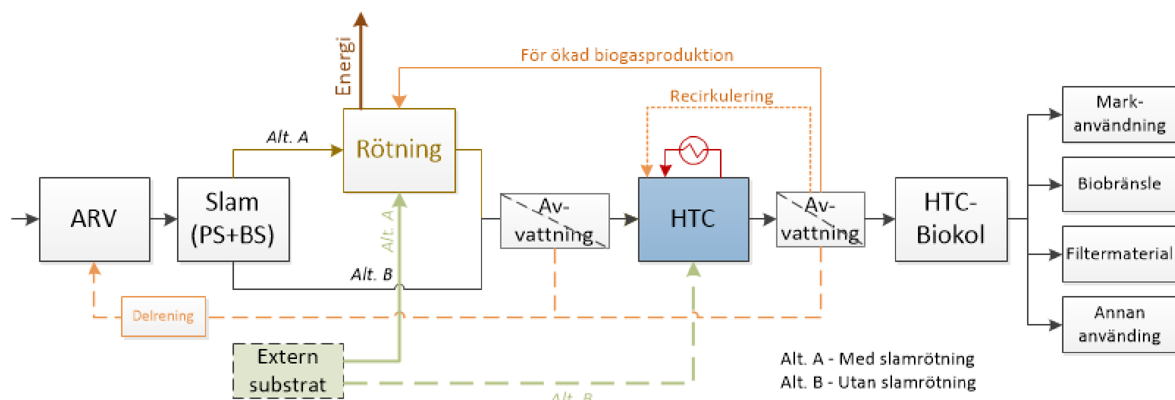
Termisk hydrolys är en process i två steg som kombinerar högtryckskokning (140 - 180 °C, 30 - 60 min, 6 - 11 bar) av slam följt av en snabb dekompression. Behandlingen leder till att cellstrukturen förstörs, slammet steriliseras och att organiskt material lättare kan brytas ned. Just därför används termisk hydrolys som en förbehandling av slam innan rötning framförallt för att öka gas-produktion och effektivisera slamavvattningen. Sveriges först fullskaleinstallation av Cambis THP-process uppfördes vid Sundets ARV i Växjö 2015 (Schnürer et al., 2017). Termisk hydrolys kräver stora värmeenergimängder för att uppnå reaktionstemperaturen. Vid Sundets ARV i Växjö installerades en extra pelletspanna för att tillgodose detta behov.

Tekniken marknadsförs sedan några år också som rötrestbehandlingsteknik (t.ex. Cambis SolidStream). Även här är hygienisering och en bättre avvattning av slammet huvudargumenten men även en möjlig ökad biogasproduktion vid återföring av rejekt från avvattningen till rötnings-processen. En testanläggning av SolidStream har varit i drift vid Amperverband (Tyskland) sedan 2016 (García-Cascallana et al., 2021)

Termisk hydrolys när den tillämpas efter slamrötning liknar HTC-processen, dock bör de olika processbetingelserna ge andra egenskaper i slutprodukten. Termisk hydrolys på rötat slam utförs under 180 °C vilket innebär att inga HTC-reaktioner sker som innebär en partiell karbonisering.

4.2 Integrering av HTC-behandling i svenska avloppsreningsverk

Hanteringen av primär- och bioslam vid kommunala reningsverk kan inkludera både anaerob slamstabilisering med slutavvattning eller endast en slutavvattning av slammet innan transport för vidare hantering utanför reningsverket (oftast lagring med efterföljande markanvändning). En HTC-process skulle kunna placeras före slutavvattningen och därmed efter ett eventuellt stabiliseringssteg med biogasutvinning eller direkt efter slamförtjockning eller eventuell för-avvattning. Typ av avvattningsutrustning påverkar dock vilka TS-halter som kan uppnås. Hur olika integreringsmöjligheter av HTC-tekniken kunde se ut vid olika reningsverk med och utan slamstabilisering presenterade C-Green och IVL redan 2017 (Figur 4) inklusive resultat från de första pilottesterna (Öhman et al., 2017). Ur energisynpunkt är det fördelaktigt att avvattna innan HTC-processen.



Figur 4. Avloppsreningsverk med och utan slamstabilisering och alternativ placering av HTC-processen.

Eftersom olika slamtyper och driftparametrar i HTC-tekniken kan påverka hur mycket av kolet, närsalter och föroreningar som hamnar i vilken delström, finns flera optimeringsmöjligheter av tekniken, t.ex. för att utvinna närsalter från olika delströmmar än i dagens slambehandling.

Jämförande miljöpåverkansstudier har pekat på en mindre miljöpåverkan inom olika påverkans-kategorier (t.ex. klimatpåverkan, försurningspotential, m.fl.) av slambehandlingssystem som inkluderar HTC jämfört med dagens slamhantering (Grundestam et al., 2020; Mayer et al., 2021).

4.2.1 Närsaltsåterföring

Koncentrationen av närsalter i det producerade biokolet efter HTC-processen varierar, dock kan upp till 95 % av totalfosforn från utgångssubstratet och drygt 50 % av totalkvävet hamna i HTC-kolet (Excala et al., 2011). Fördelningen påverkas bl.a. av pH, processtemperatur och behandlings-tid och i pilotförsök med C-Greens HTC-process som jobbar vid ca pH 7 hamnar 98-99 % av totalfosforn i HTC-biokolet. Samma tester visade att runt 40 % av kvävet, 60-80 % av kalium, 60-85 % av svavel, 70-99 % av kalcium och 82-99 % av magnesium hamnar i HTC-biokolet. Hur reningsprocessen är uppbyggd, vilka fällningskemikalier som tillsätts i reningsprocessen och därmed hamnar i slammet, och hur inkommande avloppsvatten är sammansatt, påverkar hur mycket närsalter och metaller som binds i HTC-kolet.

Utöver en direkt återföring av fosforn till jordbruket via spridning av HTC-biokolet har även en möjlig utvinning av fosfor från HTC-biokolet undersökts i ett examensarbete vid Luleå tekniska universitet, LTU i samverkan med C-Green och IVL. Ehrström (2016) undersökte experimentellt de grundläggande betingelserna för upplösning av fosfor från HTC-biokol från rötat avloppsslam. Studien visade bl.a. över 90 % av fosforinnehållet i det HTC-behandlat slam kunde lösas upp genom lakning och nästan 100 % av fosforn kunde utvinnas från lakvätskan genom fällning. Samtidigt löses även en stor andel av syra-lösliga metaller ut vilket gör att den tekniska tillämpligheten är låg. Miljöpåverkan av denna utvinning beror på energibehovet och kemikalie-användningen.

En stor del av kvävet i slammet hamnar i HTC-processvatten. Detta betyder att den interna belastningen av kväve vid reningsverket kan öka och en separat behandling av HTC-processvatten kan behövas. Samtidigt kan kvävet som vid en direkt slamspridning kunde ha läckt till miljön tas hand om vid reningsverket. Vid våtoxidation av HTC-processvatten omvandlas organiskt kväve till ammonium varvid över 90 % av totalkvävet utgörs av ammoniumjoner (ej publicerad information, C-Green 2021). Även om återvinning av kväve inte har undersökts mer en teoretiskt

så bör höga kvävehalter i olika HTC-strömmar även möjliggöra en återvinning med hjälp av olika metoder (t.ex. strippning). Ett annat alternativ till behandling är behandling av HTC-processvatten är omvänd osmos. Tekniken erbjuds som ett komplement till Ingelias HTC- teknik. Huruvida tekniken finns implementerad är okänt. Omvänd osmos möjliggör en omfattande rening av huvudströmmen.

4.2.2 Mullbildande ämnen, lukt och hygienisering

Mullbildande ämnen, alltså det organiska kolet i slammet, återfinns till 50-70% i HTC-biokolet och kan tas till vara vid spridning på åkermark samtidigt som lukt och smittrisk tas bort vid HTC-behandlingen. Tester utförda av USDA (amerikanske jordbruksdepartementet) visar på total sterilisering av stallgödsel med avseende på multresitstenta bakterier. Även DNA i virus destrueras fullständigt (Ducey et al., 2017).

4.2.3 Energiförbrukning och biobränsleproduktion

Erfarenheter från industriell skala hittills indikerar ett energibehov för HTC i intervallet 148 kWh till 350 kWh per ton ingångsslam av vilket största delen (>80 %) är i form av värmeenergi (Buttman, 2019; Stucki et al., 2015; Zhao et al., 2013).

Eftersom en HTC-behandling gör att avvattningsbarheten kan ökas avsevärt, har TS-halter på 52 % för anaerob stabiliserat och 70 % för ostabiliserat slam vid användning av endast mekanisk avvattningsteknik (centrifugering och press) rapporterats (Excala et al. 2011). Tester med C-Greens pilotanläggning i Örnsköldsvik (Öhman et al., 2017) visade TS-halter på upp till 64 % för HTC-behandlat av rötat slam utan tillsats av polymerer och optimeringar. C-Green har senare visat att TS-halten för 10 testade kommunala slam ligger mellan 55 - 69 %. Det effektiva värmevärdet för dessa HTC-biokol ligger mellan 4 - 13 GJ/t TS. Motsvarande värden i slammet ligger mellan 0,3 - 1,6 GJ/t TS (icke publicerat data, C-Green 2021). Detta innebär att energitätheten i HTC-biokol är avsevärt högre än i avvattnat slam och en substitution av fossila bränslen är en alternativ slutanvändning. Detta antingen utan vidare behandling vid samförbränning eller efter en kompletterande torkning. Vid förbränning är askhalten en viktig parameter. Analyser av HTC-behandlat rötat och orötat slam behandlat i C-Greens pilotanläggning och laboratorium visar på askhalter mellan 27 - 64 %. Motsvarande askhalter i slammet ligger mellan 20 - 55 %. Blach och Engelhart (2021) har visat att en endast HTC-behandling av slam (eller annat substrat) med en askhalt <35 % kan ge en ökning i värmevärde jämfört med utgångssubstratet vilket innebär att endast vissa avloppsslam är lämpliga för att generera biokol med högt värmevärde. C-Greens erfarenhet är att slam med det lägre värmevärdet ökar i HTC-biokol jämfört med slammet upp till minst 55 % askhalt i slammet. Vid 35 - 40 % askhalt i normalt rötat slam erhålls ett värmevärde på 6,5 - 7,5 GJ/t TS medan slammet har ett lägre värmevärde på 1,3 - 1,6 GJ/t TS.

Vid implementering av HTC-tekniken efter slamrötningen kan även en återföring av HTC-processvattnet till rötningen (se Figur 4) vara ett alternativ. Preliminära tester inom ett examensarbete vid Uppsala universitet i samarbete med C-Green och IVL visade att HTC-processvatten skulle ha kapaciteten att öka metanproduktionen med ca 10 % (Nilsson 2017). Långtidstester för att undersöka effekter över en längre tid kvarstår dock att utföras inte minst för att undersöka eventuella ackumulerings- och hämningseffekter.

Vid en eventuell torkning av slammet minskar energibehovet för slamtorkning avsevärt då torkningsprocessen börjar vid en redan relativt hög TS-halt. Vid vissa termiska behandlings-metoder som katalytisk förgasning som endast kräver en TS-halt på 60 % kan en torkning

eventuellt helt falla bort. HTC-kolet kan även förbrännas med eller utan föregående torkning beroende av förbränningsmetod och mono- eller samförbränning.

4.2.4 Reduktion av direkta och indirekta växthusgasemissioner

De två stora källorna till direkta växthusgasemissioner vid slamhantering är lustgasbildning från slammets kväve samt metan- och koldioxidemissioner från slammets organiska ämnen. Emissioner av klimatgaser vid en lagring eller spridning av slam kan minskas med en HTC-behandling då slammet stabiliseras och metan- och lustgasemissioner därmed minskar. Mycket av kvävet återförs med HTC-processvattnet och kan tas hand om men vid behandling kan det uppstå vissa lustgasemissioner.

Det ökade energivärdet hos HTC-kol jämfört med slam innebär en potential att utnyttja HTC-biokol som biobränsle i olika användningar och därmed ersätta fossila bränslen. Detta skulle på liknande sätt som biogassubstituering av fossila bränslen minska miljöpåverkan. Vid en utvinning av den termiska energin i HTC-biokol faller även de direkta växthusgasemissionerna vid spridning bort men eventuella emissioner vid en termisk behandling behöver beaktas.

En aspekt som diskuteras i samband med HTC-behandling av avloppsslam är förmågan till koldioxidbindning i HTC-kolet genom att en stabil kemisk kolinlagring sker. Detta skulle ge en positiv effekt på klimatet. Hur stabil denna inlagring är har dock inte kartlagts tillräckligt än.

En bättre avvattning innebär mindre slamvolym och -vikt och därmed mindre transporter oavsett slutanvändning av slammet. Detta har en positiv inverkan på miljön då mindre växthusgaser (och försurande ämnen) samt partiklar från tunga transporter släpps ut.

4.2.5 Reduktion av mikroföroreningar

Preliminära tester som genomfördes av C-Green i samarbete med IVL under 2015 med HTC-behandlat slam från Himmerfjärdsverket indikerade en reduktion av de flesta av de 23 analyserade läkemedelsrester i slammet till under detektionsgräns efter HTC-behandlingen. Endast ibuprofen, metoprolol, propranolol och sertralin kunde detekteras i mätbara halter efter HTC-behandling. Reduktionen uppnådde ändå mellan 71 - 98 % jämfört med slammet (IVL, inte publicerade data).

Även vom Eyser et al. (2015) rapporterar att >65% av antibiotika togs bort fram slammet vid HTC-behandling. Även andra läkemedel som karbamazepin, metoprolol, propranolol och diklofenak reducerades med upp till 87 %. Samtidigt identifierades sex transformationsprodukter i HTC-biokolet. HTC-behandlingen av avloppsslam påverkar sannolik också halter för bekämpnings-medel och andra föroreningar men det finns fortfarande ingen litteratur tillgänglig om detta.

Hämäläinen et al. (2021) rapporterar att alla 32 läkemedel som kunde kvantifieras i kommunalt rötslam kunde inte detekteras i biokolet efter HTC-behandling.

4.3 Framtidens slamhantering vid Margretelunds ARV

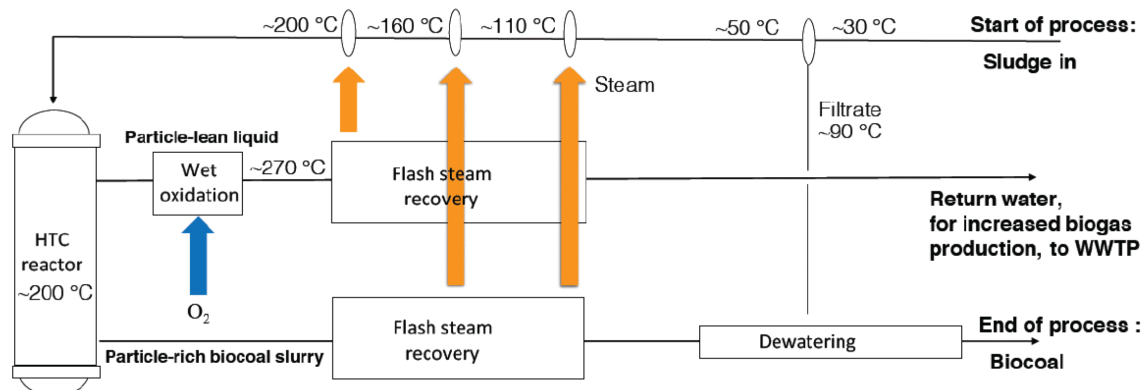
Inom pågående demonstrationsprojekt vid Roslagsvattens avloppsreningsverk Margretelund testas C-Greens OxyPower HTC för behandling av orötat blandslam som kompletteras med en separat behandling av HTC-processvatten och rejektvatten från slamavvattningen.

4.3.1 C-Greens OxyPower HTC

Den främsta utvecklingen jämfört med andra HTC-tekniker identifieras som en genomtänkt designad integration av HTC-processen med annan standardteknik. Att använda kända tekniker och kombinera dessa på det sätt som C-Green gör, skapar ett resurseffektivt HTC-system. C-Greens OxyPower HTC har i grunden en liknande design som andra HTC-processer men har utvecklats vidare. De främsta skillnaderna mot andra HTC-processer är:

- Processen körs kontinuerligt och inte satsvis som flera andra HTC-tekniker, vilket ger en effektiv hantering och styrning av processen.
- Vattnet från HTC-steget våtoxideras vilket resulterar i att lösta metaller och fosfor faller ut som separerbara partiklar, organiska ämnen bryts ned varvid COD minskar och värme produceras. Även organiskt kväve omvandlas till stor del till ammonium.
- Det bildade ångan från våtoxidationen återvinns och används för att värma upp inkommande slam.
- TS-halten på inkommande slam styrs genom tillsats av hett HTC-processvatten från avvattningen av HTC-slurryn vilket möjliggör en effektiv hantering och underlättar för ånginblandning och fasseparation i HTC-reaktorn.
- HTC-reaktordesignen innebär att bildade partiklar av HTC-biokol sedimenterar och avskiljs i reaktorns nederdel och ett partikelfattigt HTC vatten tas ut reaktorns överdel.

Kombinationen av en effektiv värmeåtervinning, reaktordesignen som underlättar en bättre separering och energianvändning och den kopplade våtoxidationen (Figur 5) ger en effektiv helhetsprocessdesign. Energiförbrukningen utgörs endast av el och uppgår beroende på grad av våtoxidation från 400 -500 kWh/t TS inkommande slam vid normal våtoxidation vilket tar bort ca 50 % av utlöst COD i det separerade vattnet. Potential finns att eliminera upp till >99 % av utlöst COD samt en >99 % omvandling av Ntot till kvävgas. Därvid blir elbehovet högre samtidigt som det uppstår ett överskott av högvärdig energi.

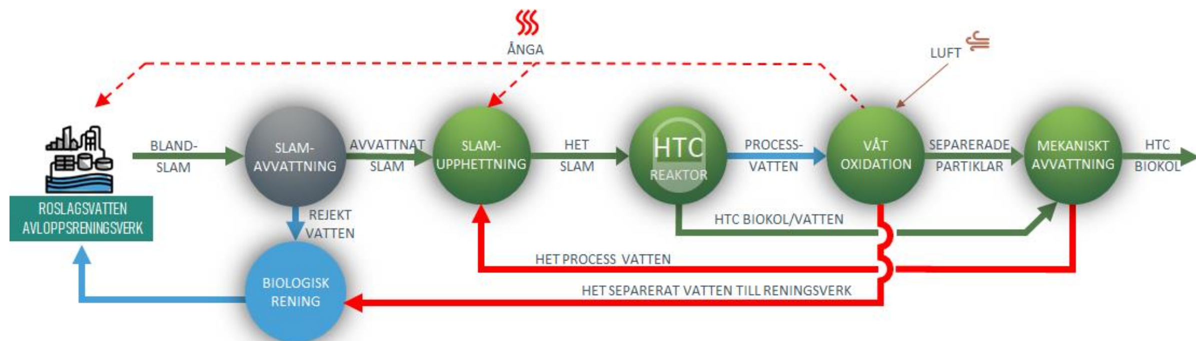


Figur 5. Schematisk översikt av C-Greens OxyPower HTC-process.

4.3.2 Implementering av OxyPower HTC vid Margretelunds ARV

Figur 6 visar hur implementeringen av OxyPower HTC-processen vid Margretelunds ARV är tänkt. Blandslam avvattnas från 3-5 % TS till 25-30 % TS innan det värms upp med varmt processvatten och därefter med ånga som produceras från OxyPower HTC. Det heta slammet behandlas sedan i HTC-reaktorn under ca 1 tim vid 200 °C vilket resulterar i COD-rikt vatten och en HTC-biokolslurry. Det COD-rika vattnet våtoxideras under tillsats av syrgas eller luft för att bryta ned COD. Vid normal våtoxidationen frigörs värme (230 °C ånga) som används bl.a. för uppvärmning av inkommande slam. HTC-slurryn och procesströmmen som innehåller partiklar från våtoxidationen avvattnas mekaniskt till slutprodukten HTC-biokol med en TS på 60 %. Det

heta avvattningsrejektet blandas med inkommande slam till HTC reaktorn. Producerat rejektvatten från den initiala slamavvattningen och hett våtoxiderat HTC-processvatten renas i ett separat biologiskt reningssteg innan det återförs till huvudprocessen.



Figur 6. Schematisk processbild för den planerade HTC-teknikintegrering vid Margretelunds ARV.

Fokus inom samverkansprojekt vid Margretelund ARV ligger på processutvärdering av OxyPower HTC inkl. material- och energibalanser, systemanalys, samt hantering av producerat HTC-processvatten som uppstår när HTC-behandlat slam omvandlas till HTC-biokol med en 60 % TS. Våtoxiderat vatten från HTC-behandlingen tillsammans med rejektvatten från Roslagsvatten ska behandlas i två pilotlinjer som består av en SBR (Sequential BioReactor) satsvis behandling och en MBBR (Moving Bed BioBeactor) vid Hammarby Sjöstadsverk för att definiera förutsättningar och driftförhållanden för en framtida behandling. Utmaningen med HTC-rejektvatten är att det kan innehålla ämnen som hämmar biologiska processer.

4.3.3 Fokusområden för utvärderingen

För att undersöka om den förslagna systemlösningen för slamhanteringen vid Margretelund ARV är ett hållbart alternativ för framtidens slamhantering vid svenska reningsverk som både minskar klimatpåverkan, minskar emissioner av närsalter till miljön och som recirkulerar viktiga resurser från avloppsvatten till landbruket har projektet tre fokusområden för utvärderingen som beskrivs i detalj nedanför.

1. Processutvärdering och -optimering.
2. Biologisk behandling av rejektvatten från slamavvattningen med våtoxiderat vatten efter HTC-behandling.
3. Karakterisering av slam och HTC-biokol.

4.3.3.1 Processutvärdering och -optimering

Data som genereras in under pilottesterna med C-Greens två pilotanläggningar för HTC-behandling respektive våtoxidation placerade vid Margretelund ARV kommer att användas för en utvärdering av teknisk prestanda samt möjliga optimeringar med avseende för specifika förutsättningar på Margretelund ARV och mer generella tillämpningar.

Följande frågeställningar kommer att ingå i utvärderingen:

- torrhalt efter slamavvattningsgrad av våtoxidation;
- torrhalt efter mekanisk slutavvattningen av HTC-biokol;
- karakterisering av olika procesströmmar;
- energibehov och generering i olika processteg;
- tekno/ekonomisk analys för hela systemet.

Systemanalyser baserat på material- och energibalanser kommer att upprättas. Olika driftsätt kommer undersökas och konsekvenser för mass- och energibalanser i reningsverket utvärderas. Till exempel, så kommer optimal torrhalt på slammet innan HTC-behandlingen och energi-optimeringar utvärderas. Även omfattningen av våtoxidation kommer undersökas med avseende på t.ex. en optimal eller maximal reduktion av kväve, COD och/eller energiåtervinning. Även data och erfarenheter från intrimningsfasen vid uppstart av pilotanläggningarna kommer nyttjas.

Baserat på data och utvärderingen av pilotförsöken kommer underlag för uppskalning och implementering för hela slamhanteringen vid Margretelund ARV göras.

C-Greens HTC-process

C-Green har sedan 2018 en pilotanläggning för HTC- behandling av slam och andra blöta organiska restströmar. I anläggningen kan OxyPower HTC processen simuleras inklusive våtoxidation fram till avvattnat HTC-biokol. Kapaciteten är ca 50 kg HTC-biokol per dag räknat som TS. Anläggningen användes som underlag inför den fullskaliga HTC- anläggningen i Stora Ensos massa/pappersbruk i Heinola Finland. Pilotanläggningen är transporterbar är installerad i en container. Under 2021 kommer en separat våtoxpilot att finnas tillgänglig.

C-Greens våtoxidationsprocess

C-Greens pilotanläggning för våtoxidation har stor flexibilitet och graden av våtoxidation kan drivas upp till 99 % COD reduktion. Kapaciteten är 50-100 liter våtoxiderat HTC-vatten per dygn

4.3.3.2 Biologisk behandling av rejektvatten

För att undersöka hur en resurseffektiv behandling av HTC-processvatten som våtoxideras i C-Greens pilotanläggning placerade i Margretelund kan se ut, kommer två pilotanläggningar för biologiskt rejektvattenrening att installeras vid FoU-anläggningen Hammarby Sjöstadsverk. Processvatten kommer behandlas med både MBBR- och SBR-teknik för att utvärdera lämpliga tekniker för en fullskaleimplementering. Svårigheten med behandling av HTC-processvatten även efter våtoxidation är att det kan innehålla ämnen som hämmar biologiska processer. Därför kommer hämningsförsök genomföras före och under pilotförsöken och resultaten kommer användas för anpassning av driftstrategin i de biologiska pilotreningsstegen.

Syftet med hämningstesterna är också att undersöka om en återföring av HTC-processvatten, med och utan våtoxidation, skulle kunna påverka nitrifikationsprocessen i huvudreningen. Våtoxiderat vatten från HTC-behandlingen kommer att blandas med dagens rejektvatten från dagens ARV hos Roslagsvatten för att definiera förutsättningar och driftförhållanden för pilotförsöken för rejektvattenrening.

Pilotförsöken kommer att inkludera en kontinuerlig uppföljning av reningseffektiviteten med hjälp av analyser av framförallt närsalter, organiska ämnen, suspenderat material och andra parametrar. Pilotprocesserna kommer kunna styras för att simulera de önskade driftscenarier.

Om möjligt kommer även lustgasemissioner från rejektvattenbehandling att mätas under pilotesterna. Detta för att ta in klimatpåverkan av reningen i helhetsbedömningen. I en tidigare genomförd studie under medverkan av IVL (Jönsson et al., 2015), har en separat rejektvattenbehandling med reningen i huvudprocessen undersökts. Studien visade bl.a. att en rening med SBR-teknik gav den högsta klimatpåverkan på grund av större emissioner av lustgas.

4.3.3.3 Karakterisering av slam och HTC-biokol

Projektet avser en karakterisering av slam och HTC-biokol för att utreda möjliga användningsområden av HTC-behandlat slam. Specifika utvärderingsaspekter inkluderar:

- En utvidgad karakterisering av obehandlat slam och HTC-biokol genom analyser av näringsämnen, energiinnehåll, askhalt, tungmetaller, PFAS, läkemedelsrester och andra analyser.
- Undersöka om bildning av PAH sker och om hygieniseringskravet är uppnått (NV 6580 och ABP-förordningen).
- Undersöka växttillgänglighet av näringsämnen i HTC-biokolet.
- Undersöka om HTC-biokolet kan användas som jordförbättringsmedel och om det finns eventuella toxiska effekter på jordmikroorganismer.
- Undersöka kriterier och eventuella hinder för att Revaq-certifiera HTC-biokolet tillverkat från Revaq-certifierat slam från Margretelunds reningsverk
- Säkerställa att HTC-biokolet kan spridas på åkermark och identifiera andra möjliga användningsområden.

HTC-biokol från HTC-pilotanläggningen vid Margretelunds ARV kommer tillsammans med slam att analyseras vid olika laboratorier. Växttillgänglighet av näringsämnen P, K, Ca, Mg, Na, Ctot, Corg, Ntot i HTC-biokolet kommer testas av SLU, Institutionen för Mark och Miljö i Uppsala. Med hjälp av odlingstester av SLU Alnarp kommer projektet testa om HTC-biokolet skulle kunna användas som jordförbättringsmedel. Långvariga inkubationsförsök planeras att genomföras för att utvärdera mineralisering och kolsänkepotential av HTC-biokolet, samt eventuella toxiska effekter på jordmikroorganismer och frisättningsdynamiken av N/P från biokolet till marksystemet. Ett exjobb har redan utförts i samarbete med Umeå Universitet för att undersöka vid vilken temperatur som det finns risk att PAH bildas vid HTC behandling av orötat slam från Margretelund.

Under hösten 2021 kommer slam från Margretelunds reningsverk att Revaq-certifieras. Målsättningen är att Revaq-certifiera även HTC-biokolet genom att visa resultat från alla analyser som har utförts i projektet. Möjligheter och eventuella hinder för certifiering av HTC-biokolet kommer därför att undersökas. Med alla tester och analysdata kommer möjligheten att undersökas för spridning av HTC-biokol på åkermark, men också andra användningsområden kommer utvärderas.

Detta fokusområde stöds finansiellt av Svenskt Vatten Utveckling (SVU) genom beviljade extramedel inom SVU-projektet 21:05-21 kring karakterisering, avsättning och Revaq-certifiering av HTC-biokol där även VA-organisationerna från Norrköping, Karlstad, Käppalaförbundet och Uppsala medverkar.

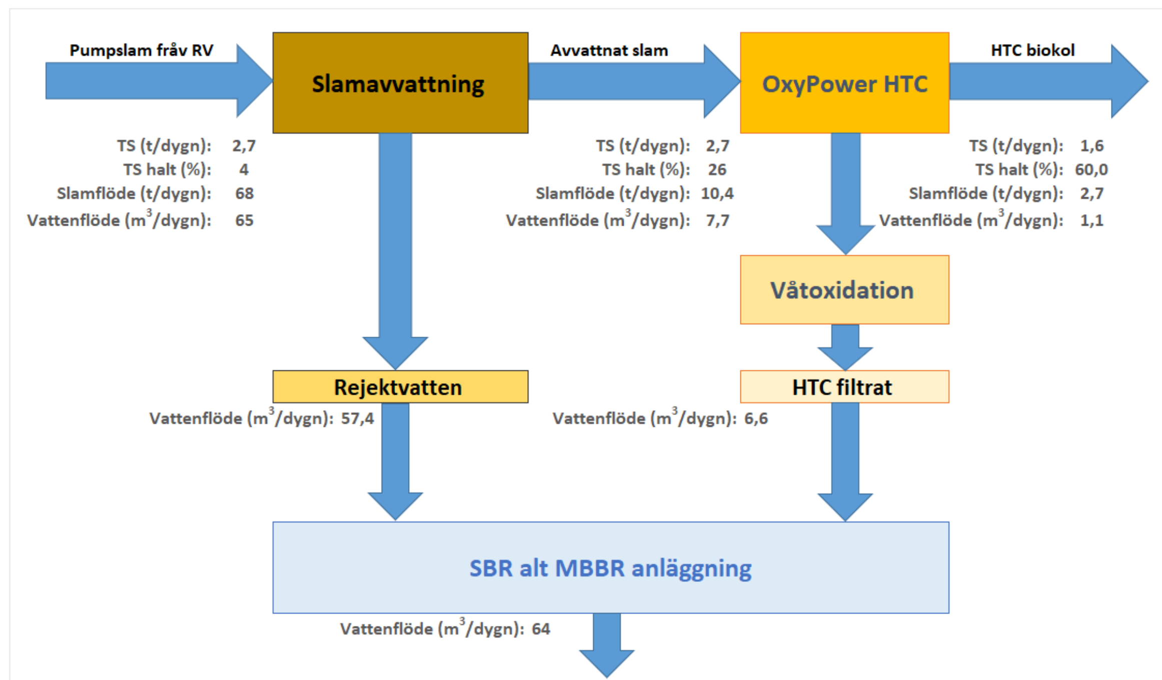
4.3.4 Basscenario

Basscenariot som ligger till grund för pilottesterna vid Margretelunds ARV utgår ifrån en genomgång av dagens slamhantering och hur implementeringen av OxyPower HTC förväntas påverka hantering samt vilka ändringar implementeringen av OxyPower HTC skulle medföra.

Som torrhalt för pilotförsöken har t.ex. en torrhalt på 26 % TS beräknats av C-Green som optimalt för att ge en avstämd flödesbild och energiutnyttjande i HTC-steget. Allt HTC-processvatten kommer att våtoxideras. Våtoxidationen kommer att drivas till olika reduktionsgrader på COD; 50 och/eller 70 % med "vanlig" våtoxidation och 90 % med katalytisk våtoxidation. Suspenderat

material i processvatten kommer att hållas under 500 mg/l genom en filtrering som i labbförsök simulerades med en manuell filtrering av provvatten.

Baserat på initiala labbskalaförsök och estimerade massbalanser för en fullskaleimplementering vid Margretelund ARV har det bestämts att två blandningar rejektvatten/HTC-processvatten kommer testades. Med en genomsnittlig daglig produktion av 57 m³ rejektvatten (vid TS 26 %) och 6,6 m³ våtoxiderat HTC-processvatten blir blandningsförhållanden 9:1 (Figur 7). Även blandningsförhållandet 4:1 kommer testas för att undersöka effekter på reningseffektiviteten, resursförbrukningen och eventuella sidoeffekter. Vid blandning av all producerat rejektvatten och hett våtoxiderat HTC-processvatten är målet att värmeinnehållet i våtoxiderat HTC-processvatten ska kunna ge en genomsnittlig temperatur i sidoströmsbehandlingen på 25 °C. Alternativt kan ånga som bildas i OxyPower HTC utnyttjas.



Figur 7. Vattenbalans vid 26 % TS efter slamavvattning innan OxyPower HTC.

5 Diskussion och slutsatser

Dagens slamhantering styrs vid många reningsverk ur ett kvittblivnings- snarare än avfall-till-resursperspektiv. Kraven för en godkänd slamhantering kommer med all sannolikhet att skärpas i framtiden och ett framtida mer hållbart samhälle kräver även en hållbar hantering av avloppsslam. Återföring av viktiga näringsämnen till åkermark är en viktig pelare i resurshushållningen. Med dagens slamspridning kan detta inte åstadkommas utan risk för negativa bieffekter och kontaminering genom oönskade mikroföroreningar. En problemfri hantering av restprodukter, lukt och utsläpp av växthusgaser är andra utmaningar som kräver en modifierad slamhantering. Även emissioner av t.ex. kväve till yt- och grundvatten bör undvikas.

Hydrotermisk karbonisering (HTC) av avloppsslam har potential att bli en av teknikerna för framtidens slamhantering som även kan ge en förenklad slamhantering vid reningsverk. HTC-tekniken skulle kunna ge en hållbar återvinning av närsalter och medföra andra positiva effekter som t.ex. mindre växthusgasutsläpp. Idag saknas dock data för detta slamhanteringsalternativ.

Målet med pilotprojektet vid Margretelunds reningsverk i Åkersberga är att undersöka om den förslagna systemlösningen med HTC-teknik kombinerat med våtoxidation av HTC-vatten kan utgöra ett hållbart alternativ för framtidens slamhantering vid svenska reningsverk som både minskar klimatpåverkan, minskar emissioner av närsalter till miljön och som recirkulerar viktiga resurser från avloppsvatten till åkermark. En sådan hantering av slam och konvertering till HTC-biokol skulle också innebära att det fortfarande skulle finnas tydliga incitament för uppströms förbättringsarbete eftersom råvaran påverkar kvaliteten på HTC-biokolet.

C-Green HTC-pilot kombinerat med en pilot för våtoxidation kommer förutom HTC-biokol till jordbruket även att generera ett våtoxiderat HTC-vatten som bl.a. innehåller föroreningar som annars skulle ha släpps ut till miljön vid slamspridning. För att undersöka vilken teknik som kan åstadkomma en resurseffektiv rening av detta filtrat, ska olika pilotreningssteg sättas upp vid FoU-anläggningen Hammarby Sjöstadsverk som matas med filtratet som produceras vid HTC-piloten och rejektvatten från Margretelund reningsverk.

Projektet har definierat vilka utmaningar som finns i dagens slamhantering, vilka alternativ som finns och hur HTC-tekniken antas kunna påverka detta. De frågetecken som finns med HTC-tekniken avses undersökas i samverkansprojektet.

Referenser

Avfall Sverige, 2018. Marknaden för biokol i Sverige. Avfall Sveriges Utvecklingssatsning, rapport 2018:14.

Baier, U., Deller, A., Escala, M., Floris, J., Gerner, G., Hartmann, F., Hölzl, B., Kohler, C., Kühni, M. 2013. Weiterentwicklung der hydrothermalen Karbonisierung zur CO2-sparenden und kosteneffizienten Trocknung von Klär-schlamm im industriellen Massstab sowie der Rückgewinnung von Phosphor.

Baresel, C., Lüdtke, M., Berg, M., Åfeldt, E., Aronsson, A. 2017. Slamtorkning som en del av slamhantering vid Syvab Himmerfjärdsverket - Resultat från FoU-samarbete Syvab-IVL. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2276.

Bergman, Åke, Heindel, J.J., Jobling, S., Kidd, K.A., Zoeller, R.T. 2013. Endocrine Disrupting Chemicals-2012. World Health Organization.

BFE 2021. HTC Innovationscampus Rheinmühle - Pilotanlage zur Hydrothermalen Karbonisierung; Prozessoptimierung & Verfahrenserkenntnisse. Bundesamt für Energie, Schweizerische Eidgenossenschaf, Bern.

Bhasin, A., Almemark, M., Arnberg, R., Ekengren, Ö., Johansson, K., Tjus, K. 2020. Framtida slamhantering – Förbränning kombinerat med fosforåtervinning ur askan. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2401.

Blach, T., Engelhart, M., 2021. Optimizing the Hydrothermal Carbonization of Sewage Sludge—Response Surface Methodology and the Effect of Volatile Solids 19.

Buttman, M. 2019. Personlig kommunikation.

Börjesson, G. 2021. Slamspridning på åkermark – mullhaltens betydelse. SVU-rapport 2021-9. Stockholm, Svenskt Vatten.

Chan, K.Y., Zwieten, L.V., Meszaros, I., Downie, A., Joseph, S., Chan, K.Y., Zwieten, L.V., Meszaros, I., Downie, A., Joseph, S. 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. Soil Res. 45, 629–634. https://doi.org/10.1071/SR07109

Cheng, C.-H., Lehmann, J., Thies, J.E., Burton, S.D. 2008. Stability of black carbon in soils across a climatic gradient. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences 113. https://doi.org/10.1029/2007JG000642

Deutschlandfunk 2021. Grüne Kohle: Zukunftstechnologie mit Startschwierigkeiten. Publiserat 18.05.2021. https://www.deutschlandfunk.de/tolle-idee-was-wurde-daraus-gruene-kohle.676.de.html?dram:article_id=497423

DBFZ 2021. HTC-Kohle. Deutsches Biomasseforschungszentrum. https://www.dbfz.de/projektseiten/hydrothermale-prozesse-htp/anwendungen-produkte/htc-kohle

Ducey, T.F., Collins, J.C., Ro, K.S., Woodbury, B.L., Griffin, D.D. 2017. Hydrothermal carbonization of livestock mortality for the reduction of pathogens and microbially-derived DNA. Front. Environ. Sci. Eng. 11, 9. https://doi.org/10.1007/s11783-017-0930-x

Ehrnström, M.S. 2016. Utvinning av fosfor från HTC-behandlat kommunalt avloppsslam. Luleå tekniska universitet, LTU.

Ekane, N., Barquet, K., Rosemarin, A. 2021. Resources and Risks: Perceptions on the Application of Sewage Sludge on Agricultural Land in Sweden, a Case Study. Front. Sustain. Food Syst. 0. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.647780

Enell et al. 2020, Biokol - från organiskt avfall till resurs för nyttiggörande av jordavfall, Syntesrapport, Statens geotekniska institut, SGI, Linköping, 2020-11-09.

Engzell, A. 2019. Destruktion av per- och polyfluorerade alkylsubstanser (PFAS) vid förbränning i avfallsförbränningsanläggningar. Examensarbete, Uppsala universitet.

Ecoprog 2020. Kommunale Klärschlammentsorgung 2035 - Prognosen – Projekte – Potenziale. Marknadsstudie, www.ecoprog.com. Köln.

Excala, M., Zumbühl, T., Koller, C., Krebs, R. 2011. Machbarkeitsstudie BAFU - Schlussbericht: Hydrothermale Carbonisierung von Klärschlamm. Zentrum CEE (ZHAW), Zürich.

Fakkaew, K., Koottatep, T., Polprasert, C., 2018. Faecal sludge treatment and utilization by hydrothermal carbonization. Journal of Environmental Management 216, 421–426. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.031

FORMAS, 2011. Återvinna fosfor – hur bråttom är det?, Formas Fokuserar.

Fransson, A.M., Gustafsson, M., Malmberg, J., Paulsson, M. 2020. Biokolhandboken – för användare.

Gale, M., Nguyen, T., Moreno, M., Gilliard-AbdulAziz, K.L. 2021. Physiochemical Properties of Biochar and Activated Carbon from Biomass Residue: Influence of Process Conditions to Adsorbent Properties. ACS Omega 6, 10224–10233. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00530

García-Cascallana, J., Barrios, X.G., Martinez, E.J., 2021. Thermal Hydrolysis of Sewage Sludge: A Case Study of a WWTP in Burgos, Spain 28. Appl. Sci. 2021, 11, 964. https://doi.org/10.3390/app11030964

Grundestam C., Johansson K., Johannesson, C., Junestedt, C., Nilsson, Å., Rahmberg, M., Nilsson, S. 2020. Livscykelanalys av framtida slamstrategier för svenska avloppsreningsverk. Rapport B2406. IVL, Svenska Miljöinstitutet.

He, C., Giannis, A., Wang, J.-Y. 2013. Conversion of sewage sludge to clean solid fuel using hydrothermal carbonization: Hydrochar fuel characteristics and combustion behavior. Applied Energy 111, 257–266.

Huang, H.J., Yuan, X.Z., 2016. The migration and transformation behaviors of heavy metals during the hydrothermal treatment of sewage sludge. Bioresour. Technol. 200, 991–998. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.099.

Hämäläinen, A., Kokko, M., Kinnunen, V., Hilli, T., Rintala, J., 2021. Hydrothermal carbonisation of mechanically dewatered digested sewage sludge—Energy and nutrient recovery in centralised biogas plant. Water Research 201, 117284. https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117284

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds.). Switzerland: IPCC.

Jeitz, P., Deiss, O., Holinger A.G. 2012. HTC für Klärschlamm (No. 4), AQUA & GAS.

Jönsson, H. 2019. Fosfor, kväve, kalium och svavel – tillgång, sårbarhet och återvinning från avlopp. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet. (Energi och teknik, 105). ISBN: 978-91-576-9689-2.

Jönsson, H., Junestedt, C., Willén, A., Yang, J., Tjus, K., Baresel, C., Rodhe, L., Trela, J., Pell, M., Andersson, S. 2015. Minska utsläpp av växthusgaser från rening av avlopp och hantering av avloppsslam. SVU-rapport 2015-02. Svenskt Vatten.

Kim, K., Fujie, K., Fujisawa, T., 2008. Feasibility of recycling residual solid from hydrothermal treatment of excess sludge. Environ. Energy Res. 13, 112–118.

Koller, C., Föllmi, C., Escala, M. 2011. Hydrothermale Carbonisierung (HTC) – Zukunftstechnologie für Energieeffizienz und CO2-Reduktion in der Klärschlammentsorgung? ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

KSLAT - Kungl. Skogs- och Lantbruksakademien, 2013. Slam och fosforkretslopp – KSLAT nr 6-2013.

Lazic, A. 2021. PM-Slam behandling Roslagsvatten 2050. Roslagsvatten AB, Intern rapport.

Liu, Z., Balasubramanian, R. 2012. Hydrothermal Carbonization of Waste Biomass for Energy Generation. Procedia Environmental Sciences 16, 159–166.

LKAB 2018. LKAB utvecklar ny teknik för att producera strategiska mineraler från gruvavfall. Pressmeddelande 2018-07-04.

LRF - Lantbrukarnas Riksförbund, 2010. Spridning Av Avloppsslam. Motion till Regionförbundsstämman Nr 3, Dala-Järna Lrf-Avdelning.

Mayer, F., Bhandari, R., Gäth, S.A. 2021. Life cycle assessment of prospective sewage sludge treatment paths in Germany. J Environ Manage 290, 112557. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112557

Minx, J.C., Lamb, W.F., Callaghan, M.W., Fuss, S., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., de Oliveira Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., Lenzi, D., Luderer, G., Nemet, G.F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente Vicente, J.L., Wilcox, J., del Mar Zamora Dominguez, M. 2018. Negative

emissions—Part 1: Research landscape and synthesis. Environ. Res. Lett. 13, 063001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9b

Naturvårdsverket 2021. Miljö- och hälsofarliga ämnen i slam. (online) https://www.sverigesmiljomal.se/miljomalen/giftfri-miljo/farliga-amnen-i-slam/

Nilsson, E. 2017. Rötningsförsök med HTC processvatten. Examensarbete 30 hp, Institutionen för energi och teknik; Bioenergi, Sveriges lantbruksuniversitet (SLU), Uppsala. ISSN 1401-5765.

Niinipuu, M., Latham, K.G., Boily, J.-F., Bergknut, M., Jansson, S. 2020. The impact of hydrothermal carbonization on the surface functionalities of wet waste materials for water treatment applications. Environ Sci Pollut Res 27, 24369–24379. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08591-w

Revaq, 2015. Regler för certifikationssystemet v 3.2. http://www.svensktvatten.se/Documents/Kategorier/Avlopp%20och%20milj%C3%B6/REVAQ/Revaq-regler%202015%203.2.pdf (2015-08-26)

Riedel, G., Koehler, R., Poerschmann, J., Kopinke, F.-D., Weiner, B., 2015. Combination of hydrothermal carbonization and wet oxidation of various biomasses. Chem. Eng. J. 279, 715–724.

SCB (Statistiska Centralbyrån) 2018. Utsläpp till vatten och slamproduktion 2018. Statistiska meddelanden MI 22 SM 2001.

Schnürer, A., Del Pilar Castillo, M., Edström, M., Andersson Chan, A., Karlsson, S. Jahre Nilsen, P. 2017. Termisk hydrolys vid Sundets biogasanläggning - Utvärdering av förbehandling av rötslam i Växjö. Energiforsk rapport 2017:367.

Silfver, E. 2020. Förbränning av avloppsslam - Utredning av förutsättningar för en anläggning i Umeå. Examensarbete, 30 hp, Umeå Universitet.

Silva, R.D.V.K., Lei, Z., Shimizu, K., Zhang, Z., 2020. Hydrothermal treatment of sewage sludge to produce solid biofuel: Focus on fuel characteristics. Bioresource Technology Reports 11, 100453. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100453

Stucki, M., Eymann, L., Gerner, G., Hartmann, F., Wanner, R., & Krebs, R. (2015). Hydrothermal carbonization of sewage sludge on industrial scale: energy efficiency, environmental effects and combustion. Journal of Energy Challenges and Mechanics, 2(2), 38-44.

Svanström M., Heimersson S., Harder R. 2016. Livscykelanalys av slamhantering med fosforåterföring. SVU-Rapport Nr 2016:13.

Sveriges Konsumenter i Samverkan, 2014. Faktablad Avloppsslam [WWW Document]. URLhttp://www.konsumentsamverkan.se/11verk/kampanj/slammet/slamfakta_text.html

Svenskt Vatten, 2013. Slamanvändning och strategier for slamanvändning. Meddelande No. M137.

Svenskt Vatten, 2019. REVAQ Renare vatten - bättre kretslopp. Regler för certifieringssystemet. Utgåva 5.0.

SVOA 2018. Slamstrategi för Stockholm Vatten och Avfall. Stockholm Vatten och Avfall, Dnr 18MB673.

Tasca, A.L., Puccini, M., Gori, R., Corsi, I., Galletti, A.M.R., Vitolo, S., 2019. Hydrothermal carbonization of sewage sludge: A critical analysis of process severity, hydrochar properties and environmental implications. Waste Management 93, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.027

vom Eyser, C., Palmu, K., Schmidt, T.C., Tuerk, J., 2015. Pharmaceutical load in sewage sludge and biochar produced by hydrothermal carbonization. Sci. Total Environ. 537, 180–186. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.021.

Växjö tingsrätt, 2012. Mark- och miljödomstolen DOM 2012-09-24 mål M 648-10.

Wang, L., Li, A., Chang, Y., 2016. Hydrothermal treatment coupled with mechanical expression at increased temperature for excess sludge dewatering: heavy metals, volatile organic compounds and combustion characteristics of hydrochar. Chem. Eng. J. 297, 1–10. https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2016.03.131.

Wilk M (2016) A novel method of sewage sludge pre-Treatment-HTC. E3S Web Conf 10:1–5. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20161000103

Willén, A., Junestedt, C., Rodhe, L., Pell, M. & Jönsson, H., 2017. Sewage sludge as fertilizer – environmental assessment of storage and land application options. Water Science and Technology, 75(5), 1034-1050.

Wirth, B., Reza, T., Mumme, J., 2015. Influence of digestion temperature and organic loading rate on the continuous anaerobic treatment of process liquor from hydrothermal carbonization of sewage sludge. Bioresour. Technol. 198, 215– 222. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.022.

Xu Y, Yang F, Zhang L, et al (2018) Migration and transformation of phosphorus in municipal sludge by the hydrothermal treatment and its directional adjustment. Waste Manag 81:196–201. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.011.

Zhang, J.H., Lin, Q.M., Zhao, X.R., 2014. The hydrochar characters of municipal sewage sludge under different hydrothermal temperatures and durations. J. Integr. Agric. 13, 471–482. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13), 60702-9.

Zhao, P., Shen, Y., Ge, S., Yoshikawa, K. (2013). Energy recycling from sewage sludge by producing solid biofuel with hydrothermal carbonization. Energy Conversion and Management, 815–821.

Öhman, F., Lundqvist, F., Nordström, J.E., Lüdtke, M., Baresel, C., Fortkamp, U. 2017. Results from Hydro Thermal Carbonisation (HTC) of sludge. NORDIWA - Nordic Wastewater Conference, 10-12 October, Aarhus, Denmark.





IVL Svenska Miljöinstitutet AB // Box 210 60 // 100 31 Stockholm
Tel 010-788 65 00 // www.ivl.se